

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: ELECTRICIDAD



PROYECTO FIN DE CARRERA

**CARACTERIZACIÓN DE UN DIELECTRICO MEDIANTE
ENVEJECIMIENTO POR TENSIÓN ALTERNA**

AUTOR: Carlos Rodríguez Moya
DIRECTOR: Juan Carlos Burgos Díaz
CODIRECTOR: Simón Dávila Solano

Octubre, 2010





AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a mi familia por el enorme esfuerzo realizado y por su apoyo incondicional para que finalmente pudiera lograr este objetivo.

Agradecer a mi gente de Lugo por estar siempre ahí, y a mis amigos de universidad por hacerme sentir como en casa y demostrarme que aquí tengo otra familia.

Y por supuesto dar las gracias a Juan Carlos Burgos, a mi tutor Simón Dávila por la oportunidad de trabajar con él, y a Ángel Gómez porque sin él no habría podido realizar este proyecto.





Índice.

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN. | 1 |
| 2 | FUNDAMENTOS TEÓRICOS. | 5 |
| 2.1 | LOS MATERIALES DIELECTRICOS. REPRESENTACIÓN CIRCITAL. | 5 |
| 2.2 | RESISTENCIA VOLUMÉTRICA Y SUPERFICIAL. | 9 |
| 2.3 | TANGENTE DE DELTA ($\tan\delta$), PÉRDIDAS DIELECTRICAS Y PERMITIVIDAD. | 10 |
| 2.4 | DESCARGAS PARCIALES. | 12 |
| 2.5 | TENSIÓN DE RUPTURA. | 17 |
| 3 | PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL. | 19 |
| 3.1 | MONTAJE DEL PROCESO DE ENVEJECIMIENTO. | 19 |
| 3.2 | MEDIDA DE RESISTENCIA SUPERFICIAL Y VOLUMÉTRICA. | 27 |
| 3.2.1 | COMPONENTES. | 28 |
| 3.3 | MEDIDA DE TANGENTE DE DELTA Y PERMITIVIDAD. | 30 |
| 3.3.1 | COMPONENTES. | 31 |
| 3.4 | MEDIDA DE DESCARGAS PARCIALES. | 33 |
| 3.4.1 | COMPONENTES | 35 |
| 3.5 | MEDIDA DE TENSIÓN DE RUPTURA. | 37 |
| 3.5.1 | COMPONENTES | 39 |
| 4 | ANÁLISIS DE RESULTADOS. | 41 |
| 4.1 | ENVEJECIMIENTO. | 41 |
| 4.2 | RESISTENCIA SUPERFICIAL Y VOLUMÉTRICA. | 48 |
| 4.3 | TANGENTE DE DELTA Y PERMITIVIDAD. | 52 |
| 4.4 | DESCARGAS PARCIALES. | 57 |
| 4.5 | TENSIÓN DE RUPTURA. | 62 |
| 5 | CONCLUSIONES. | 67 |
| 6 | PRESUPUESTO. | 71 |
| 6.1 | COSTE DEL MATERIAL. | 71 |
| 6.2 | COSTE DEL PERSONAL. | 72 |
| 6.3 | COSTE TOTAL. | 73 |
| 7 | BIBLIOGRAFÍA. | 75 |



Índice de figuras.

| | |
|---|----|
| Figura 1: Átomo típico de un dieléctrico en la ausencia de un campo eléctrico. | 5 |
| Figura 2: Corriente de fuga en un dieléctrico. | 6 |
| Figura 3: Corrientes superficial y volumétrica en un dieléctrico. | 6 |
| Figura 4: Átomo bajo un campo eléctrico aplicado. | 7 |
| Figura 5: Representación circuital de un dieléctrico. | 9 |
| Figura 6: Modelo paralelo simplificado de un dieléctrico. | 10 |
| Figura 7: Modelo simplificado serie de un dieléctrico. | 11 |
| Figura 8: Material dieléctrico con vacuola de gas. | 12 |
| Figura 9: Campo eléctrico en un dieléctrico con una vacuola de aire. | 13 |
| Figura 10: Comportamiento del campo eléctrico en la frontera entre dos dieléctricos. | 14 |
| Figura 11: Circuito equivalente de las descargas parciales internas. | 15 |
| Figura 12: Modelo circuital de las descargas externas o efecto corona. | 15 |
| Figura 13: Modelo circuital completo de un dieléctrico. | 16 |
| Figura 14: Muestra de elastómero sin envejecer. | 19 |
| Figura 15: Esquema del diseño para el proceso de envejecimiento I. | 20 |
| Figura 16: Esquema del diseño para el proceso de envejecimiento II. | 21 |
| Figura 17: Electrodo de envejecimiento. | 22 |
| Figura 18: Regulador de tensión: variac. | 22 |
| Figura 19: Fusibles de seguridad del montaje de envejecimiento. | 23 |
| Figura 20: Conexiones a tierra. | 23 |
| Figura 21: Montaje de envejecimiento sin aceite I. | 24 |
| Figura 22: Montaje de envejecimiento sin aceite II. | 24 |
| Figura 23: Montaje final de envejecimiento con aceite. | 25 |
| Figura 24: Esquema de ensayo y medición de resistencia superficial. | 27 |
| Figura 25: Esquema de ensayo y medición de resistencia volumétrica. | 27 |
| Figura 26: Equipo de medida Keithley modelo 6517A. | 28 |
| Figura 27: Celda de medida de ensayo de resistencia 8009. | 29 |
| Figura 28: Conexiones entre el electrómetro y la celda para las medidas de resistencia superficial y volumétrica. | 29 |
| Figura 29: Esquema eléctrico del circuito de medida de tangente de delta. | 30 |
| Figura 30: Montaje del ensayo de medida de tangente de delta. | 31 |
| Figura 31: Medidor de descargas (LDV-5). | 31 |
| Figura 32: Módulo de control (SM-4-1) y regulador de tensión (LM-30-1). | 32 |
| Figura 33: Sensores dieléctricos (LDV-5). | 32 |
| Figura 34: Electrodos de medida. | 32 |
| Figura 35: Condensador de SF ₆ | 33 |
| Figura 36: Esquema eléctrico del circuito indirecto de descargas parciales. | 33 |
| Figura 37: Montaje de ensayo de descargas parciales. | 34 |
| Figura 38: PDCheck. Medidor de descargas parciales. | 35 |
| Figura 39: Módulo de control (GLP1-e HV). | 35 |



| | |
|---|----|
| Figura 40: Cuadripolo PQ2..... | 35 |
| Figura 41: Condensador de acoplamiento de 1 nF..... | 36 |
| Figura 42: Electrodo y celda de medida..... | 36 |
| Figura 43: Transformador de corriente (HFCT)..... | 36 |
| Figura 44: Esquema eléctrico del circuito de ensayo de tensión de ruptura..... | 37 |
| Figura 45: Montaje de ensayo de tensión de ruptura..... | 38 |
| Figura 46: Módulo de control (SM-41) y regulador de tensión (LM-30-1)..... | 39 |
| Figura 47: Impedancia de medida (LDM5)..... | 39 |
| Figura 48: Celda y electrodos de medida..... | 39 |
| Figura 49: Condensador de acoplamiento..... | 40 |
| Figura 50: Muestras ordenadas de menor a mayor tiempo de envejecimiento: [(a): sin envejecimiento; (b): 15 días; (c): 30 días; (d): 45 días; (e): 60 días; (f): 75 días]..... | 41 |
| Figura 51: Electrodo de muestras 1 a 5..... | 42 |
| Figura 52: Desgaste del cobre, muestras 1 a 5..... | 42 |
| Figura 53: Electrodo de muestras 6 a 10..... | 43 |
| Figura 54: Desgaste del cobre, muestras 6 a 10..... | 43 |
| Figura 55: Electrodo de muestras 11 a 15..... | 44 |
| Figura 56: Desgaste del cobre muestras 11 a 15..... | 44 |
| Figura 57: Electrodo de muestras 16 a 20..... | 45 |
| Figura 58: Desgaste del cobre muestras 16 a 20..... | 45 |
| Figura 59: Electrodo de muestras 21 a 25..... | 46 |
| Figura 60: Desgaste del cobre muestras 21 a 25..... | 46 |
| Figura 61: Representación de la resistencia superficial de las 25 muestras en función del tiempo de envejecimiento..... | 51 |
| Figura 62: Representación de la resistencia volumétrica de las 25 muestras en función del tiempo de envejecimiento..... | 52 |
| Figura 63: Representación de la evolución de la $\tan\delta$ en función del tiempo de envejecimiento..... | 56 |
| Figura 64: Representación de la evolución de la permitividad en función del tiempo de envejecimiento..... | 56 |
| Figura 65: Representación de la evolución de las descargas parciales de las 25 muestras en función del tiempo de envejecimiento..... | 59 |
| Figura 66: Representación de la evolución de la tensión media de las descargas internas de las 25 muestras en función del tiempo de envejecimiento..... | 59 |
| Figura 67: Patrón de descargas parciales de la muestra 3 (15 días de envejecimiento)..... | 60 |
| Figura 68: Patrón de descargas parciales de la muestra 7 (30 días de envejecimiento)..... | 60 |
| Figura 69: Patrón de descargas parciales de la muestra 13 (45 días de envejecimiento)..... | 61 |
| Figura 70: Patrón de descargas parciales de la muestra 19 (60 días de envejecimiento)..... | 61 |
| Figura 71: Patrón de descargas parciales de la muestra 22 (75 días de envejecimiento)..... | 61 |
| Figura 72: Representación de la evolución de la tensión de ruptura en función del tiempo de envejecimiento..... | 64 |
| Figura 73: Muestra 4 tras ensayo de ruptura..... | 65 |
| Figura 74: Electrodo tras ensayo de ruptura..... | 65 |



Índice de tablas.

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Relación de transformación. | 25 |
| Tabla 2: Velocidad de subida de tensión aconsejada en función de la tensión de ensayo.... | 38 |
| Tabla 3: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las 25 muestras sin envejecer. | 48 |
| Tabla 4: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las 5 primeras muestras envejecidas. | 49 |
| Tabla 5: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las muestras 6 a 10 envejecidas. | 49 |
| Tabla 6: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las muestras 11 a 15 envejecidas. | 49 |
| Tabla 7: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las muestras 16 a 20 envejecidas. | 50 |
| Tabla 8: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las muestras 21 a 25 envejecidas. | 50 |
| Tabla 9: Valores de $\tan\delta$ de 5 muestras aleatorias sin envejecer. | 52 |
| Tabla 10: Valores de $\tan\delta$ de las muestras 1 a 5 envejecidas. | 53 |
| Tabla 11: Valores de $\tan\delta$ de las muestras 6 a 10 envejecidas. | 54 |
| Tabla 12: Valores de $\tan\delta$ de las muestras 11 a 15 envejecidas. | 54 |
| Tabla 13: Valores de $\tan\delta$ de las muestras 16 a 20 envejecidas. | 55 |
| Tabla 14: Valores de $\tan\delta$ de las muestras 21 a 25 envejecidas. | 55 |
| Tabla 15: Valores de descargas parciales de 5 muestras al azar sin envejecer. | 57 |
| Tabla 16: Valores de descargas parciales de las 25 muestras envejecidas. | 58 |
| Tabla 17: Valores de la tensión de ruptura de las 25 muestras. | 63 |
| Tabla 18: Coste del material. | 71 |
| Tabla 19: Salario anual estimado por profesión. | 72 |
| Tabla 20: Coste por hora de cada trabajador. | 72 |
| Tabla 21: Duración del proyecto y personal empleado. | 72 |
| Tabla 22: Coste total en mano de obra. | 73 |
| Tabla 23: Coste total del proyecto. | 73 |



Capítulo I

1 INTRODUCCIÓN.

Los aislamientos eléctricos están concebidos para impedir el paso de corriente eléctrica entre elementos sometidos a distintos niveles de potencial. Por este motivo deben soportar diferentes esfuerzos eléctricos durante la vida útil que se les presupone. Estos esfuerzos acarrearán una degradación progresiva en los aislamientos pudiendo ocasionar su ruptura antes de lo esperado. Por lo tanto es necesario estudiar los factores que degradan los aislamientos para así poder determinar de una manera más exacta las propiedades eléctricas de cada material aislante. Dimensionar adecuadamente los niveles de aislamiento del dispositivo eléctrico a proteger en función de las necesidades a cubrir es la base para favorecer y prolongar el funcionamiento de dicho dispositivo eléctrico.

El objetivo de este proyecto es caracterizar un aislante sólido de propiedades desconocidas mediante un proceso de envejecimiento por tensión alterna y la realización de diversas pruebas normalizadas. Los valores que se obtienen de éstas mediciones dan la suficiente información como para sacar conclusiones del comportamiento de un material. Cabe destacar que el material a estudiar es un polímero elastómero, del cual no se tiene ninguna información por parte del fabricante, ni de su composición y propiedades eléctricas, ni del ámbito de uso del mismo.

La metodología que se emplea para conseguir el objetivo es someter al material a una tensión constante durante un tiempo de dos meses y medio con el fin de simular el envejecimiento que sufre el material en un periodo de su vida útil. Periódicamente se retira del envejecimiento un grupo de muestras del material para realizarles las distintas pruebas. De esta manera se puede ver la evolución del material en función del tiempo de utilización. Las medidas a realizar son las de resistencia superficial y volumétrica, tangente de delta y permitividad, descargas parciales y por último tensión de ruptura. Todo el proceso experimental tiene lugar en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la universidad Carlos III de Madrid.



También es importante comentar las limitaciones de las que se parten para realizar el proyecto:

En primer lugar, hay una cantidad limitada de material, lo que condiciona la duración del proceso de envejecimiento del material.

Además, la dificultad para disponer de una cámara térmica puesto que había otros proyectos en curso, junto la escasez de material, hace que no se pueda someter al material a un envejecimiento por temperatura. Este proceso es muy interesante puesto que la temperatura es uno de los factores que más influye en la vida útil de un aislante.

Otra limitación que se encuentra es la de no poder realizar la técnica de pulso electroacústico, prueba que también es muy interesante de realizar para observar los posibles desplazamientos de carga espacial en nuestro material. El motivo por el que no se puede llevar a cabo esta medición es porque el grosor de nuestras muestras triplica la restricción de grosor que impone el equipo de TechImp Systems S.R.L. del laboratorio.

Para terminar, comentar que la memoria del proyecto se desarrolla en cinco capítulos, en cada uno de los cuáles se trata un tema fundamental en la realización del proyecto:

En este primer capítulo se trata de plantear una pequeña introducción que establezca una base para una mejor comprensión del resto del proyecto.

En el segundo capítulo se abordan los fundamentos teóricos que explican el comportamiento de un aislante y en los que están basadas cada una de las pruebas que se realizan en el proyecto.

En el tercer capítulo se explica con detalle el procedimiento experimental que se lleva a cabo para poder realizar el montaje necesario en el proceso de envejecimiento y el montaje de cada una de las pruebas.

En el cuarto capítulo se presentan y se analizan los resultados, intentando justificar el comportamiento de nuestro material.



En el quinto capítulo se plasman las conclusiones a las que se llegan al final de la realización del proyecto y se comentan posibles líneas futuras.

En el sexto capítulo se presenta un presupuesto aproximado de la realización de este proyecto.

En el séptimo y último capítulo se citan las referencias bibliográficas utilizadas para la escritura de esta memoria.



Capítulo II

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1 LOS MATERIALES DIELECTRICOS. REPRESENTACIÓN CIRCUITAL.

Los dieléctricos o aislantes son materiales cuyas cargas dominantes en átomos y moléculas son cargas negativas y positivas en enlaces que son mantenidos en su lugar por fuerzas atómicas y moleculares, y por tanto no tienen movilidad. Los dieléctricos o aislantes ideales no contienen ningún tipo de cargas libres (como si las tienen los materiales conductores), y sus átomos y moléculas son microscópicamente neutrales, tal como se muestra en la figura 1 [1].

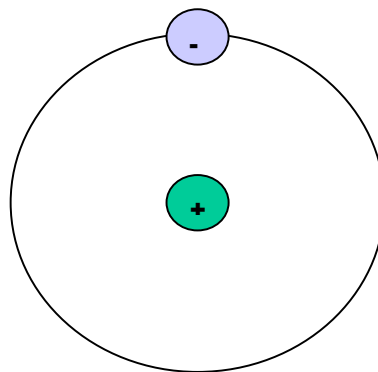


Figura 1: Átomo típico de un dieléctrico en la ausencia de un campo eléctrico.

Sin embargo cuando un campo eléctrico externo es aplicado, aparece una corriente de fuga (ver figura 2), que circula a través del mismo. La corriente de fuga, deriva su nombre de la misión de un aislante, la cual es no permitir el paso de corriente entre dos electrodos, pero por el hecho de no ser ideal, existe pues esta corriente.

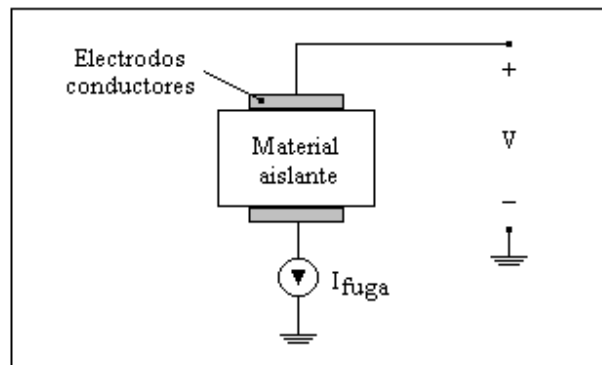


Figura 2: Corriente de fuga en un dieléctrico.

El valor y forma de la corriente de fuga de un dieléctrico dependen de la geometría y estructura molecular del dieléctrico, y de la forma y magnitud de la tensión aplicada al aislante.

La corriente de fuga es en realidad la suma de dos intensidades que circulan por el dieléctrico, una denominada corriente superficial (que circula por la superficie del dieléctrico), y la otra denominada corriente volumétrica (que circula a través del dieléctrico) tal como se muestra en la figura 3.

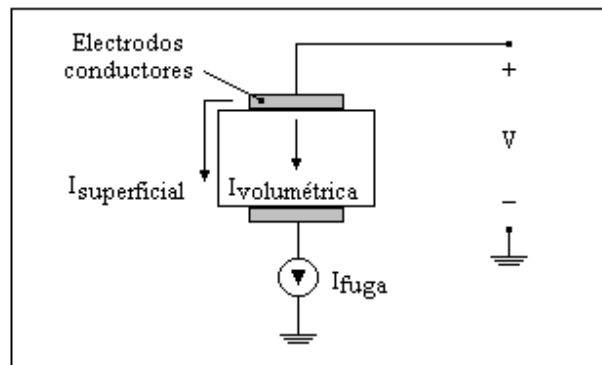


Figura 3: Corrientes superficial y volumétrica en un dieléctrico.

La corriente superficial, es consecuencia de la contaminación que se adhiere a la superficie del aislante y de las imperfecciones superficiales del material. Estos dos elementos permiten establecer caminos de menor resistencia a la corriente. Es por ello que el nivel de

contaminación y la humedad ambiental juegan un papel importante en la conducción superficial del aislante, ya que crean caminos de baja resistencia en la superficie del aislante, lo que trae como consecuencia el aumento de la corriente de superficie.

La corriente volumétrica, circula por todo el volumen del dieléctrico, y depende de la estructura molecular del material, del nivel de humedad absorbida y de la geometría (características físicas) de dicho dieléctrico. Los aislantes tienen cierto grado de porosidad, por tanto absorben humedad, la cual produce una disminución de la resistencia volumétrica del dieléctrico. Esta disminución de la resistencia volumétrica trae como consecuencia un aumento de la corriente volumétrica. Las variaciones de la corriente volumétrica sirven para determinar el grado de degradación y el estado físico del dieléctrico.

La corriente volumétrica está formada por dos componentes. Una es la corriente de conducción, que es una corriente formada por las cargas libres que provienen de las impurezas e imperfecciones del material y que son impulsadas por el campo eléctrico aplicado. La otra es la corriente de polarización. Durante el proceso de polarización las cargas positivas y negativas en enlaces, no se mueven hacia la superficie del material, como sucede en el caso de los conductores, sino que sus respectivos centroides se desplazan ligeramente de su posición original relativa, creando numerosos dipolos eléctricos tal como se muestra en la figura 4 [1].

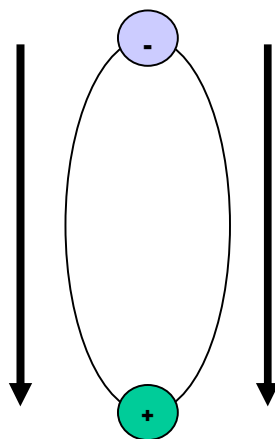


Figura 4: Átomo bajo un campo eléctrico aplicado.



Este desplazamiento del centroide de las cargas, en contraposición a las fuerzas de los enlaces, producto de la aplicación del campo eléctrico, es la que otorga al material la habilidad de almacenar energía eléctrica. Este tipo de energía es análoga a la energía almacenada en un resorte, es decir es un tipo de energía potencial. Al eliminar el campo eléctrico, las cargas regresan a su estado de energía original, excepto por una fracción de la energía que se pierde por roces entre iones en los procesos de orientación, lo cual produce un calentamiento del aislante. La corriente de polarización aumenta con el aumento de la intensidad de campo eléctrico, y solo tiene importancia cuando el campo eléctrico es originado por tensiones alternas [1].

Después de considerar los procesos de conducción en un dieléctrico, se puede llegar a definir un modelo circuital del mismo. En la figura 5 se muestra el circuito equivalente de un aislante.

- La corriente superficial genera pérdidas por calor por lo que se puede representar como una resistencia R_s .
- La corriente volumétrica en sus dos componentes:
 - La corriente de conducción se puede representar como una resistencia R_c , debido a las pérdidas que genera la misma.
 - La corriente de polarización, también genera pérdidas por lo que se representa como una resistencia R_p .
- La C , capacitancia ideal del dieléctrico.

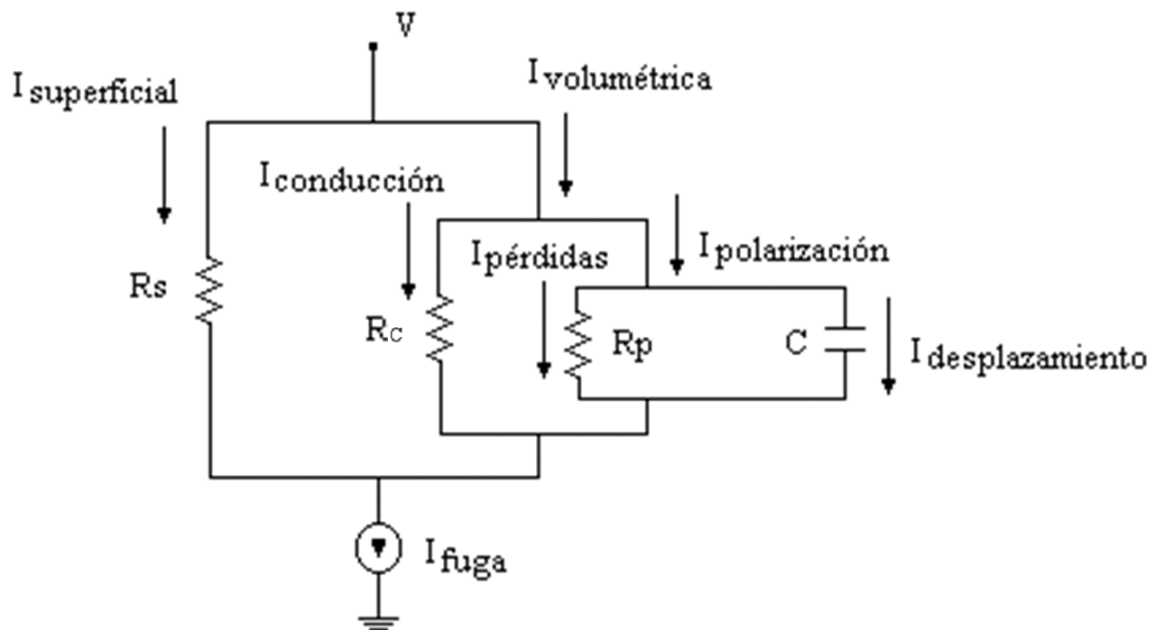


Figura 5: Representación circuital de un dieléctrico.

2.2 RESISTENCIA VOLUMÉTRICA Y SUPERFICIAL.

Como se ha explicado en el apartado anterior, la circulación de la corriente de fuga da lugar a pérdidas en forma de calor, y esas pérdidas se pueden representar como una resistencia. La resistencia superficial representa las pérdidas que genera la corriente superficial y la resistencia volumétrica las que genera la corriente volumétrica. El conocimiento de la resistencia superficial y de la resistencia volumétrica de un dieléctrico da muchos detalles sobre el comportamiento de dicho aislante y permite ir completando la representación circuital del dieléctrico en cuestión, que es un esquema bastante aproximado de lo que es en realidad un aislante. Cuanto mayor sea el valor de estas resistencias, mayor será la oposición que haga el dieléctrico a la circulación de corriente superficial y corriente volumétrica, en definitiva a la corriente de fuga [2].

2.3 TANGENTE DE DELTA ($\tan\delta$), PÉRDIDAS DIELÉCTRICAS Y PERMITIVIDAD.

Cuando aplicamos una corriente alterna a un dieléctrico perfecto, la corriente adelanta al voltaje en 90° , sin embargo debido a las pérdidas, la corriente adelanta el voltaje en solo $90^\circ - \delta$, siendo δ el ángulo de pérdida dieléctrica. Cuando la corriente y el voltaje están fuera de fase, se pierde energía o potencia eléctrica generalmente en forma de calor. Por este motivo la tangente de delta es un excelente indicador del estado y de la calidad del aislamiento. Este valor debe ser lo más bajo posible y variar lo mínimo posible con el tiempo. Es uno de los indicadores más utilizados para saber si un aislante puede seguir realizando su trabajo o necesitada ser reemplazado.

El dieléctrico también puede representarse de manera simplificada, mediante dos circuitos, uno serie y otro paralelo. Mediante esta representación simplificada (figuras 6 y 7) se puede determinar el factor de disipación o $\tan\delta$ del dieléctrico, las pérdidas dieléctricas y las permitividad del aislante [1].

- Modelo paralelo:

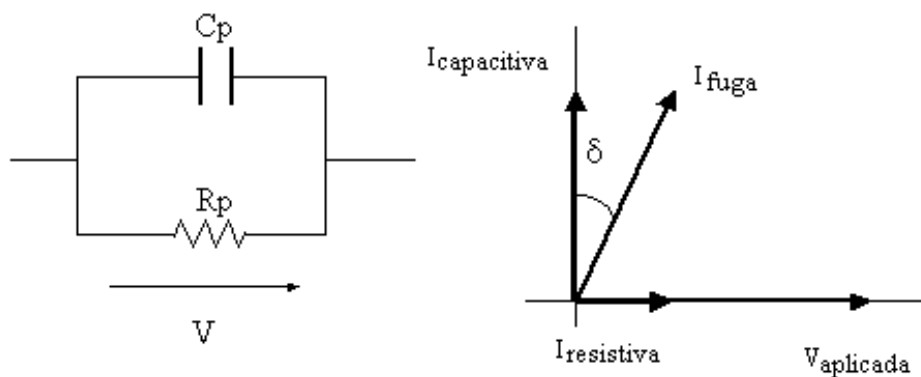


Figura 6: Modelo paralelo simplificado de un dieléctrico.

Las relaciones circuitales son:

$$I_c = \omega \cdot C_p \cdot V$$

$$I_r = V/R_p$$

$$\text{Factor de disipación: } \tan \delta = 1/(\omega \cdot C_p \cdot R_p)$$

$$\text{Perdidas dieléctricas: } P = V \cdot I \cdot \cos \theta = V^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot \tan \delta$$

$$\text{Permitividad: } \epsilon = C \cdot d/A, \quad \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Donde:

C = capacitancia en faradios [F].

ϵ = constante que depende del medio aislante y recibe el nombre de permitividad [F/m] o [C^2/Nm^2].

ϵ_0 = permitividad del vacío = 8.85×10^{-12} [F/m] o [C^2/Nm^2].

ϵ_r = permitividad relativa o coeficiente dieléctrico del aislante.

A = área de uno de los electrodos en metros cuadrados [m^2].

d = distancia entre los electrodos en metros [m].

- Modelo serie:

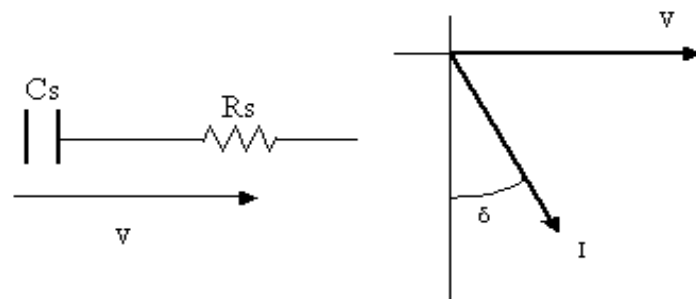


Figura 7: Modelo simplificado serie de un dieléctrico.

Las relaciones circuitales son:

Tensiones: $V_r = I \cdot R_s$, $V_c = I/\omega \cdot C_s$

Factor de disipación: $\tan \delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s$

Permitividad: $\epsilon = C \cdot d/A$, $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

2.4 DESCARGAS PARCIALES.

Los materiales dieléctricos presentan imperfecciones. Dentro de estos defectos, está la presencia de vacuolas o cavidades microscópicas llenas de gas que se forman dentro del dieléctrico durante el proceso de fabricación (figura 8).

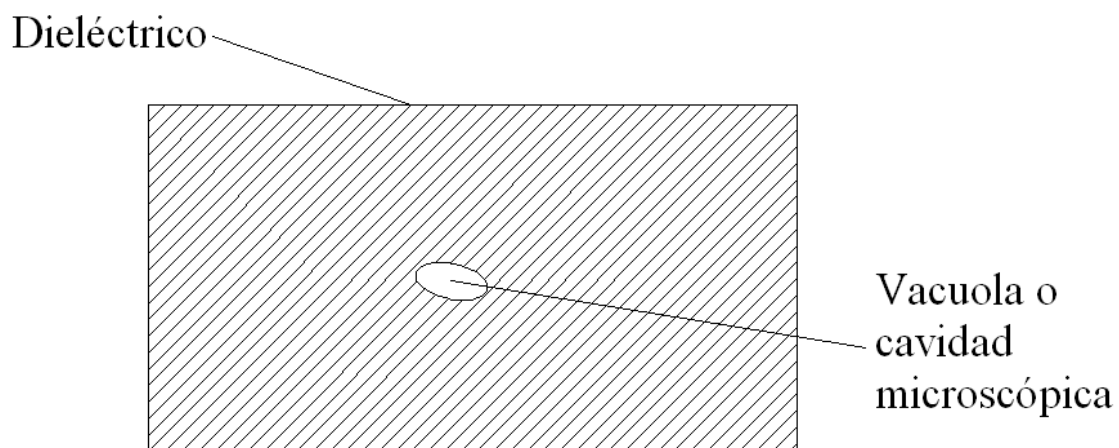


Figura 8: Material dieléctrico con vacuola de gas.

Al aplicar un campo eléctrico, la diferencia de permitividades entre el aislante y el gas de la vacuola va a producir que la intensidad de campo eléctrico en la vacuola sea mayor que en el dieléctrico y por tanto se produzcan pequeñas descargas de carácter parcial dentro de la vacuola (figura 9) [1].

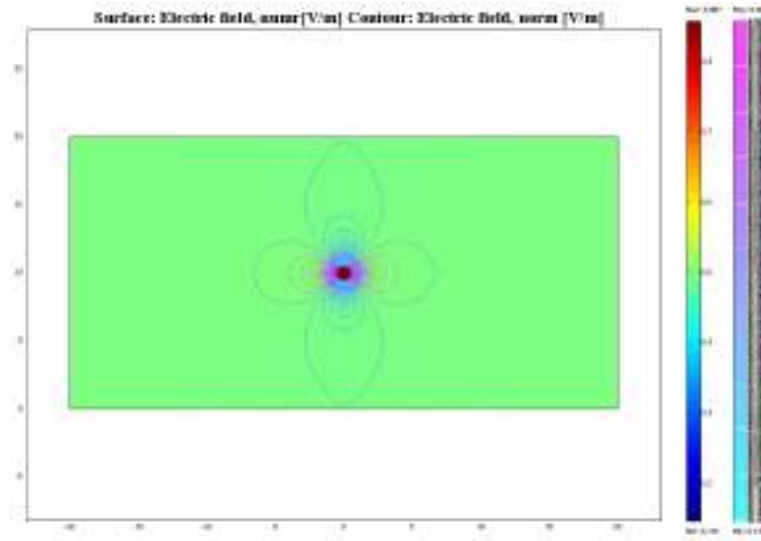


Figura 9: Campo eléctrico en un dieléctrico con una vacuola de aire.

Esto se explica con la ecuación que relaciona las intensidades de campo eléctrico en la frontera entre dos materiales dieléctricos.

La ecuación plantea que los vectores de desplazamiento eléctrico deben ser iguales tanto en el dieléctrico 1 (D_1) como en el dieléctrico 2 (D_2), de manera que:

$$D_1 - D_2 = 0$$

$$D_1 = D_2$$

Como el vector desplazamiento eléctrico puede expresarse como $D = \epsilon \cdot E$, entonces las ecuaciones anteriores quedan:

$$\epsilon_1 \cdot E_1 - \epsilon_2 \cdot E_2 = 0$$

$$\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2$$

de aquí se tiene, que si $\epsilon_2 < \epsilon_1$, como generalmente sucede entre un aislante sólido y una vacuola de aire, entonces la intensidad de campo eléctrico E_2 será mayor que la intensidad de campo eléctrico E_1 , por lo que la diferencia de potencial que soporta la vacuola puede superar su rigidez dieléctrica produciendo ruptura y llevar a la aparición de descargas parciales (figura 10).

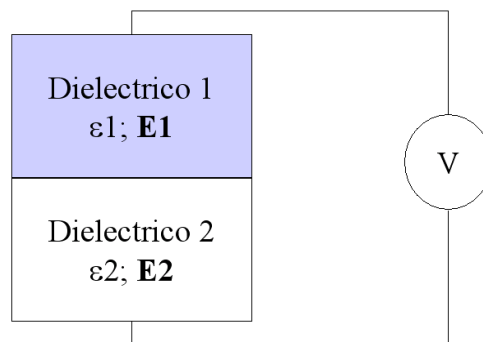


Figura 10: Comportamiento del campo eléctrico en la frontera entre dos dieléctricos.

Las descargas parciales son impulsos de corriente de baja energía, los cuales causan deterioro de las paredes de la cavidad, y por tanto, pueden a la larga tener un efecto nocivo en el material aislante. Las descargas parciales producen un deterioro gradual que puede conducir al material aislante hasta la ruptura.

Existen dos tipos principales de descargas parciales:

- Descargas parciales internas: Son las que se producen dentro de las vacuolas o imperfecciones internas del dieléctrico. En la figura 11 se puede observar el circuito equivalente que explica el fenómeno de las descargas parciales internas. La capacitancia C_1 representa la capacitancia del material sin cavidades. la capacitancia C_2 representa la capacitancia del material que está por encima y por debajo de la cavidad, y la capacitancia C_v representa la capacitancia de la cavidad. El explosor representa el fenómeno de ruptura que se produce dentro de la cavidad y que cortocircuita la capacitancia de la vacuola. Al alcanzar la tensión de ruptura de la cavidad U_d , se produce la descarga parcial, cayendo la tensión en la cavidad a un valor de tensión residual, U_r . Las descargas se suceden una tras otra hasta que ocurre un cambio de polaridad, comenzando una nueva serie de descargas pero con la polaridad opuesta. Como las cargas representativas del material son capacitivas, la tensión teórica en la cavidad, está en fase con la tensión aplicada al dieléctrico, por lo que las descargas parciales se observan próximas a los pasos por cero de la onda de tensión [1].

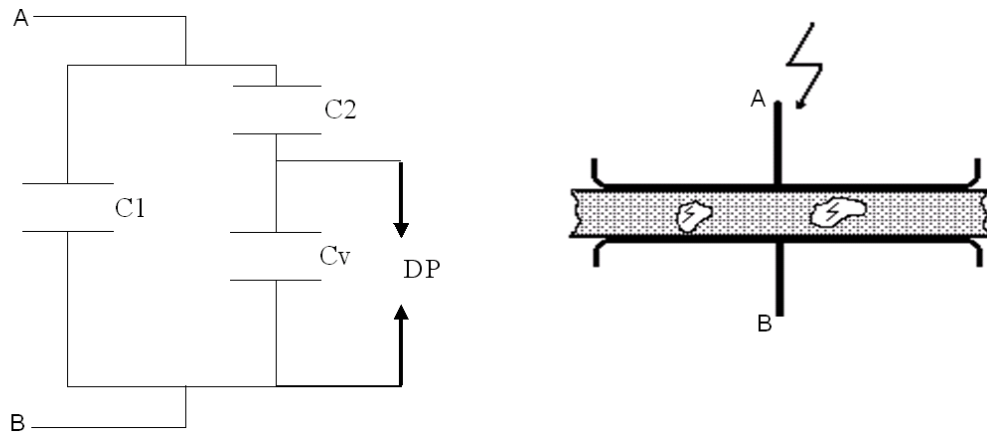


Figura 11: Circuito equivalente de las descargas parciales internas.

- Descargas externas o efecto corona: Generalmente ocurre por efecto de la forma de los electrodos, especialmente si estos son puntiagudos o con contornos afilados. En estas áreas el campo eléctrico es de una mayor intensidad debido a la poca área del electrodo, lo que crea una alta ionización del aire y por tanto al chocar las cargas eléctricas generan una liberación de energía, ya sea en forma de fotones (Luz) o en forma de radiación electromagnética (interferencia). El efecto corona es una fuente de perturbación electromagnética importante, y además es también una fuente de pérdidas en los sistemas de transmisión en alta tensión. El modelo circuital para representar el efecto corona es mostrado en la figura 12. Las descargas por efecto corona aparecen en las zonas cercanas al pico de las onda de tensión [1].

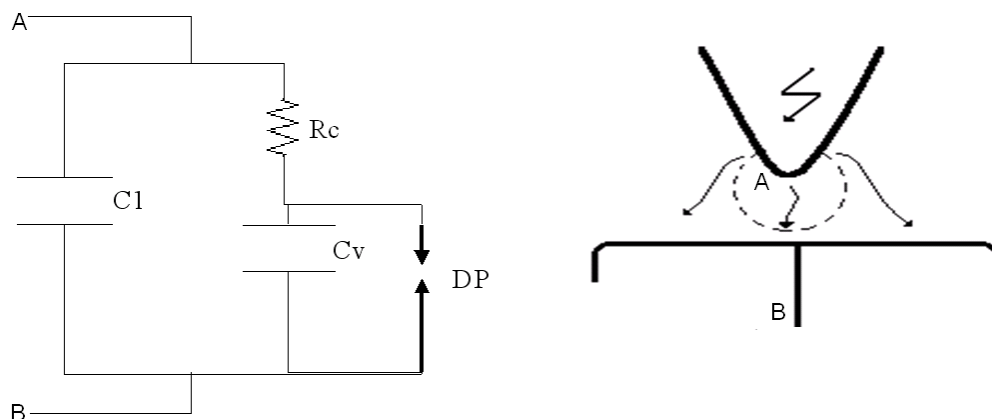


Figura 12: Modelo circuital de las descargas externas o efecto corona.

Modelo circuital completo de un dieléctrico

Con la obtención de las medidas de descargas parciales se puede completar el modelo circuital completo de un dieléctrico, que es un esquema bastante significativo de lo que es en realidad un aislante y su comportamiento.

En la figura 13 se representa el modelo circuital completo de un dieléctrico sin incluir las descargas externas o efecto corona.

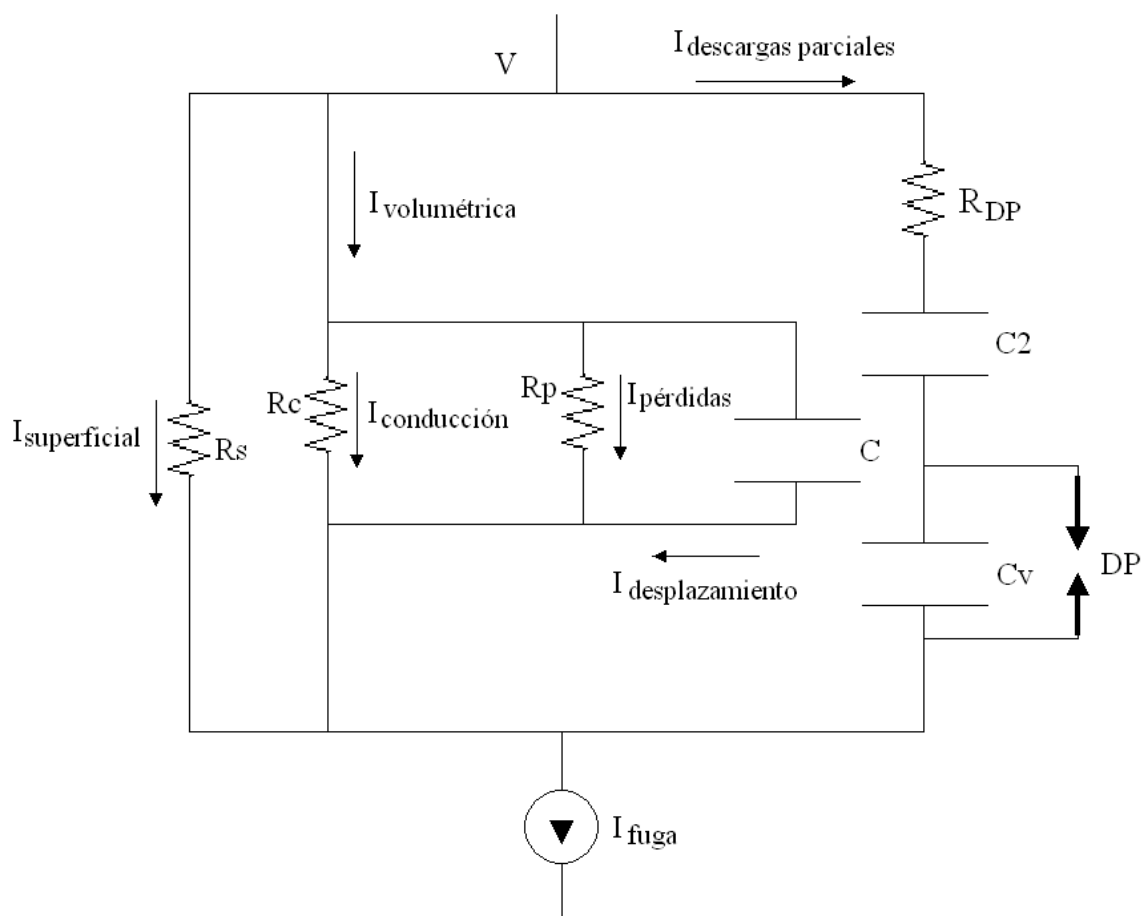


Figura 13: Modelo circuital completo de un dieléctrico.



2.5 Tensión de Ruptura.

La tensión de ruptura es una característica de los materiales aislantes que define la máxima diferencia de potencial que será posible aplicar a través del material. Si se rebasa esta tensión el material pasará a conducir. En el caso de los aislantes sólidos al sobrepasar este límite se produce un flujo repentino de corriente eléctrica a través del material que causa una serie de cambios físicos permanentes creando un camino conductor. La superación de la tensión de ruptura producirá una perforación dieléctrica [2].

Cuando la tensión en los aislantes sólidos aumenta y se aproxima a la tensión de ruptura, la corriente crece exponencialmente, pero no varía tan radicalmente con el paso del tiempo a una tensión constante. Este aumento de corriente a altas tensiones se cree que resulta de la inyección de carga por parte de un electrón o de la multiplicación de electrones en la mayor parte del material, o de ambos. Por otra parte, si en el material se encuentran impurezas o defectos estructurales, éstas pueden permitir el paso de electrones a través de dicho material [3].

Bajo condiciones normales, el mismo material presenta un amplio margen de rigidez dieléctrica, dependiendo de las condiciones ambientales y del método de ensayo. La tensión de ruptura obtenida de un ensayo está influenciada por un gran número de factores externos tales como temperatura, humedad, duración de la prueba, si se aplica corriente alterna o corriente continua, la presión aplicada a los electrodos y muchos otros factores.

Conocer la tensión de ruptura de un material aislante es imprescindible a la hora de dimensionar el aislamiento de cualquier dispositivo eléctrico puesto que hay que prevenir que el dieléctrico debe soportar las posibles sobretensiones a las que se vea sometido sin romperse. Además el nivel tensión de ruptura puede ofrecer una idea de cuál puede ser la tensión nominal a la que debería trabajar el aislante, puesto que debe ser sustancialmente menor a este valor para asegurar lo máximo posible su correcto funcionamiento.



Capítulo III

3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

3.1 MONTAJE DEL PROCESO DE ENVEJECIMIENTO.

El material sobre el cual se va a realizar el estudio es un elastómero de composición y características desconocidas, puesto que la empresa fabricante del material no ha facilitado dicha información. Se tiene una cierta cantidad del elastómero y partir de ésta se preparan muestras de 10 cm de largo por 10 cm de ancho, teniendo un grosor de 1,35 mm. Con estas dimensiones se obtienen 25 muestras (figura 14).



Figura 14: Muestra de elastómero sin envejecer.

Por otro lado hay que tener en cuenta que para obtener resultados fiables es conveniente hacer las pruebas a varias muestras en las mismas condiciones, por lo que se decide hacer las pruebas en grupos de 5 muestras, obteniendo de esta manera 5 grupos diferentes para el estudio.

Para conseguir caracterizar el material es importante ver la evolución que tiene éste en función del tiempo de envejecimiento. Por ello cada 15 días se retirará un grupo de muestras y se les hará los ensayos de medida de resistencia superficial y volumétrica, de tangente de delta, de descargas parciales y de tensión de ruptura, con el objetivo de

caracterizar dicho material. De esta manera se obtendrán medidas sin envejecimiento y cada 15 días de envejecimiento hasta llegar a un máximo de 75 días.

Por último, antes de pasar a la construcción del montaje, hay que decidir el valor de tensión de envejecimiento, que será constante durante todo el proceso. Para esta decisión es importante estimar una tensión lo suficientemente alta como para poder observar cambios en el material, pero sin excederse para no dañar prematuramente el aislante y de esta manera estropear el proceso de envejecimiento. Sabiendo de antemano que la muestra sin envejecer tiene una tensión de ruptura de unos 23 kV, gracias a unas pruebas que se realizaron en el laboratorio con anterioridad a este proyecto, se escoge 5 kV como tensión de envejecimiento.

Se quiere poner a tensión 25 muestras del material por lo que hay que diseñar un montaje que pueda dar exactamente la misma tensión a todas las muestras, y además sea lo más práctico posible a la hora de retirar cada grupo a su debido tiempo, para así causar el menor trastorno posible al proceso de envejecimiento. Las muestras se sumergen en aceite para evitar de esta manera una posible ruptura dieléctrica del aire entre la superficie de los electrodos y la placa de cobre (figura 15).

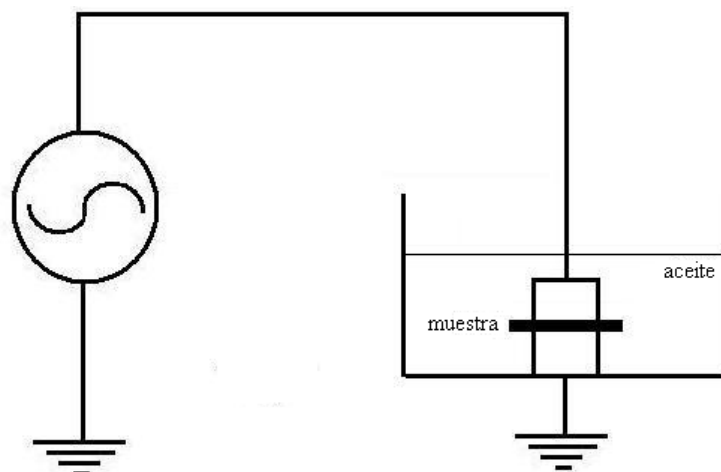


Figura 15: Esquema del diseño para el proceso de envejecimiento I.

Para poner las muestras y los electrodos en aceite es necesario un recipiente donde poner todos los elementos junto con el aceite. Para eso se utilizan dos cubas de plástico, y las que mejor se ajustan a nuestras necesidades tienen unas medidas 80 cm de largo, 60 cm de ancho y 23 cm de profundidad cada una. Las cubas se ponen sobre una mesa de madera del laboratorio de 180 cm de largo y 80 cm de ancho. Dentro de cada cuba se coloca una lámina de cobre con el mismo largo que la cuba y con 40 cm de ancho. Estas láminas se conectan a tierra y sobre ellas se colocan las muestras. La disposición de las muestras se hace de manera que haya la mayor separación posible entre las muestras, y que esta separación sea la misma entre todas, pero al tener dos cubas es necesario repartir dos grupos de muestras en una cuba y tres grupos en la otra. En la figura 16 se muestra un esquema aproximado del diseño.

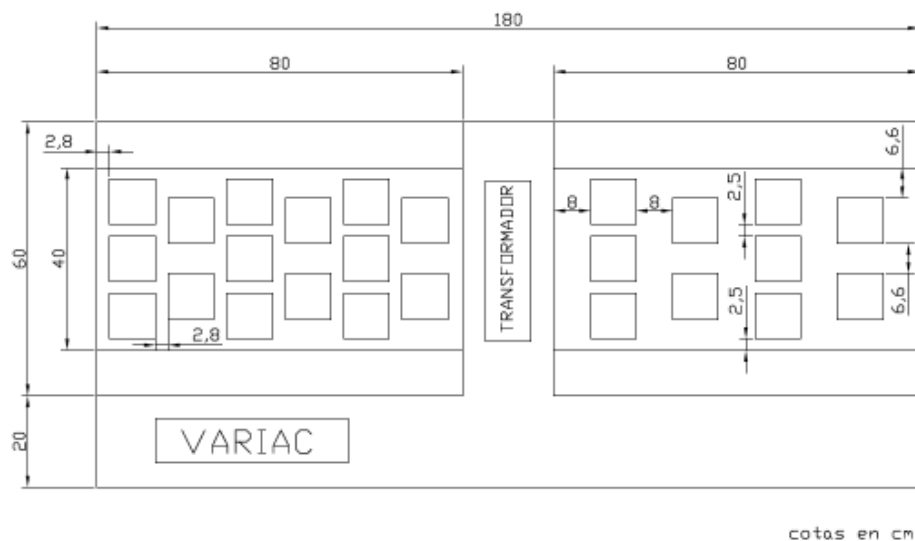


Figura 16: Esquema del diseño para el proceso de envejecimiento II.

Sobre cada muestra va colocado un electrodo. Se utilizan unos electrodos cilíndricos pertenecientes al laboratorio de 7,5 cm de diámetro y 2 cm de altura (figura 17). Es importante tener en cuenta que los electrodos sean más pequeños que las muestras para que así el sobrante del material evite que se pueda producir un arco eléctrico entre el electrodo y la lámina de cobre que está conectada a tierra. Se conectan los electrodos entre sí en grupos

de cinco, formando un anillo, y cada uno de los cinco grupos resultantes se conectan a la misma fuente de alimentación.

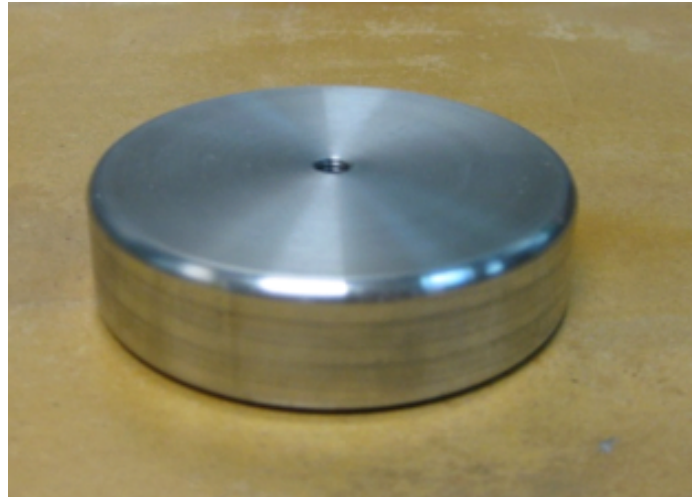


Figura 17: Electrodo de envejecimiento.

Para alimentar a los electrodos se utiliza un transformador, y un autotransformador (variac). El variac es un autotransformador que permite regular la tensión que tendrá a la salida mediante un mando (figura 18).



Figura 18: Regulador de tensión: variac.

Dicho autotransformador va conectado a la red y nos permitirá regular la tensión a la que alimentemos. Aunque el variac tiene su propio sistema de protección, se conecta al transformador mediante unos fusibles para que si hay algún fallo en el montaje salten estos y no la protección del variac y así asegurarse de que no pase el fallo a la red, haciendo que salten otras protecciones. Los fusibles van conectados al lado de baja tensión del transformador, como se puede apreciar en la figura 19.



Figura 19: Fusibles de seguridad del montaje de envejecimiento.

El lado de alta del transformador está formado por dos bornas, uno que alimenta al sistema, y otro que junto con la carcasa del transformador va conectado a tierra. Por limpieza en el montaje todas las puestas a tierra se conectan entre sí y al mismo punto de tierra, en este caso se conecta por comodidad a una de las placas de puesta a tierra que cubren las paredes del laboratorio. En la figura 20 se muestran unas imágenes de las conexiones a tierra.



Figura 20: Conexiones a tierra.

Del borne de alimentación salen las cinco conexiones que suministran tensión a cada uno de los cinco grupos de electrodos, y las cinco muestras de cada grupo están conectadas entre sí formando un anillo. El cable que se utiliza para dichas conexiones es de 25 kV con aislamiento de teflón, y se conecta con cada electrodo mediante el uso de terminales circulares y de tornillos que anclen los terminales a cada electrodo (figuras 21 y 22).

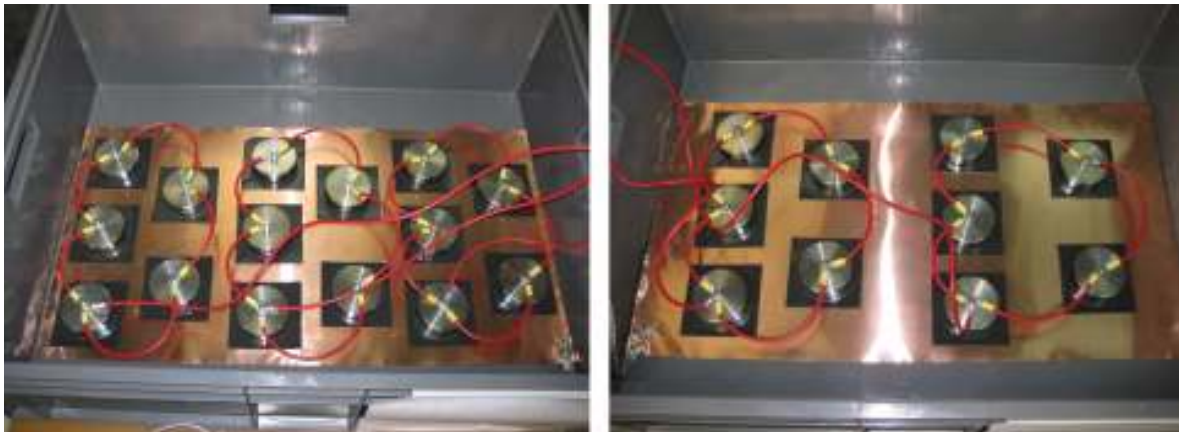


Figura 21: Montaje de envejecimiento sin aceite I.



Figura 22: Montaje de envejecimiento sin aceite II.

A continuación se echa aceite en las cubas hasta que cubran por completos los electrodos y los terminales, lo que suponen unos 15 litros de aceite para cada cuba (figura 23).



Figura 23: Montaje final de envejecimiento con aceite.

Antes de poner a tensión se necesita conocer la relación de transformación que se tiene en el transformador. Aunque en la placa de características del transformador viene la relación de transformación en función de las conexiones que se realicen, se decide hacer una comprobación y sacar la relación de transformación exacta haciendo unas pruebas a distintas tensiones de poco valor para asegurarse de no dañar las muestras en caso de error. Para realizar esto se mide con un polímetro la tensión a la salida del variac y con otro polímetro la tensión en el lado de alta tensión del transformador. Se toman varias medidas y se realizan los cálculos necesarios (tabla 1).

| Baja Tensión [V] | Alta Tensión [kV] | Relación de transformación [A.T. /B.T.] |
|---------------------|----------------------|--|
| 8,07 | 1,085 | 134,45 |
| 17,24 | 2,344 | 135,96 |
| 21,06 | 2,869 | 136,23 |
| | | $\overline{R.T.} = 135,55$ |

Tabla 1: Relación de transformación.



Se toma la media de las relaciones de transformaciones obtenidas. A partir de este dato podemos saber qué valor de tensión se necesita a la salida del variac para obtener los 5 kV que se necesitan a la salida del transformador.

$$V_{\text{variac}} = \frac{5 \cdot 10^3}{135,55} \sim 37 \text{ V}$$

Entonces hay que regular el variac a un valor de 37 V aproximadamente para de esta manera suministrar los 5 kV aproximados que se quieren por el lado de alta tensión del transformador.

Como ya se ha explicado anteriormente cada 15 días se extraen 5 muestras para someterlas a las pruebas pertinentes. En el proceso de retirada de muestras siempre se llevan a cabo los mismo pasos.

En primer lugar se desconecta el montaje de la tensión apagando el variac, y se retiran las conexiones que no vayan a ser necesarias en adelante.

Lo siguiente es sacar los electrodos y las muestras de las cubas y limpiarlos cuidadosamente. Es importante limpiar bien las muestras para que no queden restos de aceite que puedan alterar las características del material. En un principio se usa acetona para limpiar las muestras pero se observa que les quita brillo así que para alterarlas lo mínimo posible se procede a limpiarlas con etanol desde ese momento. Se guarda el material en unas bolsas de plástico para evitar lo máximo posible en contacto con el aire.

Cuando se termina de trabajar en la zona del montaje se vuelve a poner a tensión el sistema. Se conecta el variac de nuevo y se sube la tensión hasta llegar a la adecuada. Se mide con un polímetro la tensión a la salida del variac para comprobar que es la correcta.

Todo este proceso interesa que sea lo más rápido posible para que las muestras estén el menor tiempo posible sin tensión pero sin descuidar nunca la seguridad de uno mismo.

3.2 MEDIDA DE RESISTENCIA SUPERFICIAL Y VOLUMÉTRICA.

En este apartado se explica el procedimiento a realizar para obtener las medidas de resistencia superficial y volumétrica [4]. Para ello se utiliza el equipo de medida de alta resistencia Keithley Modelo 6517A junto con la celda de sólidos Keithley Modelo 8009.

En las figuras 24 y 25 se muestran un esquema aproximado del circuito de ensayo.

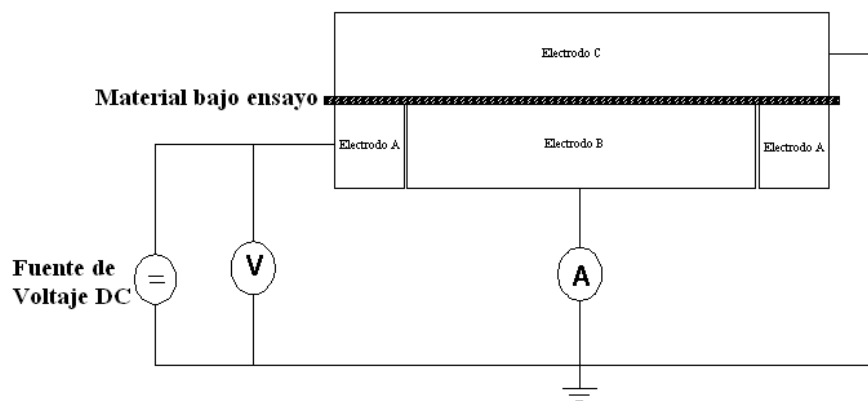


Figura 24: Esquema de ensayo y medición de resistencia superficial.

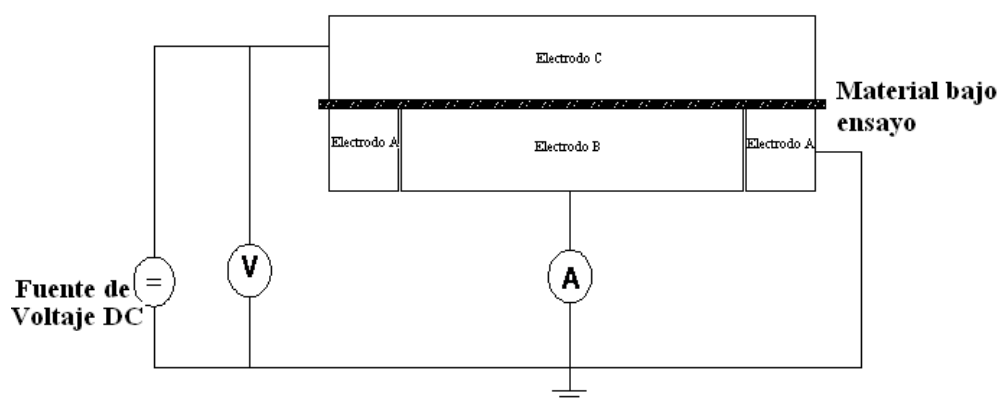


Figura 25: Esquema de ensayo y medición de resistencia volumétrica.

La resistencia superficial se determina a partir de la tensión aplicada y de la corriente medida, utilizando la siguiente fórmula:

$$R = V/I$$

Donde V es el voltaje aplicado entre los electrodos A y C (ver figura 24) e I es la corriente medida en el amperímetro.

La resistencia volumétrica se determina de manera análoga a la resistencia superficial, pero en esta ocasión V es el voltaje aplicado al electrodo C (ver figura 25) e I es la corriente medida en el amperímetro.

El proceso para las dos medidas es idéntico con la salvedad de seleccionar la posición adecuada en un pulsador de la celda de medida que distingue entre resistencia volumétrica y superficial.

Una vez configurado el equipo, se hace pasar una corriente a través del dieléctrico y se espera un tiempo prudencial para que se estabilice esa corriente antes de tomar los valores oportunos, los cuales aparecen en la pantalla del equipo de medida.

3.2.1 COMPONENTES.

- Equipo de medida Keithley modelo 6517A (figura 26).



Figura 26: Equipo de medida Keithley modelo 6517A.

- Celda de medida de ensayo de resistencia 8009 marca Keithley para utilización con el equipo 6517A Keithley (figura 27).



Figura 27: Celda de medida de ensayo de resistencia 8009.

Las conexiones entre el electrómetro y la celda para las dos medidas de resistencia tanto superficial como volumétrica se pueden ver en la figura 28.

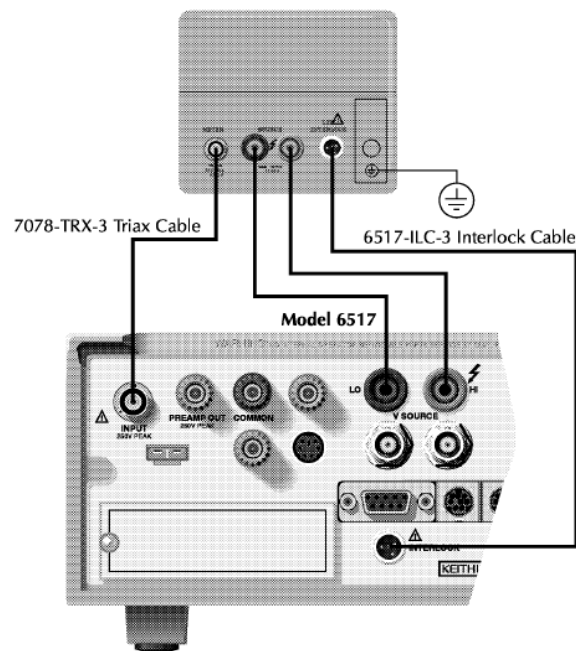


Figura 28: Conexiones entre el electrómetro y la celda para las medidas de resistencia superficial y volumétrica.

3.3 MEDIDA DE TANGENTE DE DELTA Y PERMITIVIDAD.

A continuación se explica el procedimiento a seguir para realizar ensayos de tensión alterna en la medición de tangente de delta [5]. Los equipos necesarios para la realización de estos ensayos son el módulo de control (SM-4-1) junto con el regulador de tensión (LM-30-1) y el medidor de descargas (LDV-5).

Realizar el montaje (siempre con la pértiga conectada), como de muestra en las fotografías tomadas al montaje realizado (figuras 29 y 30).

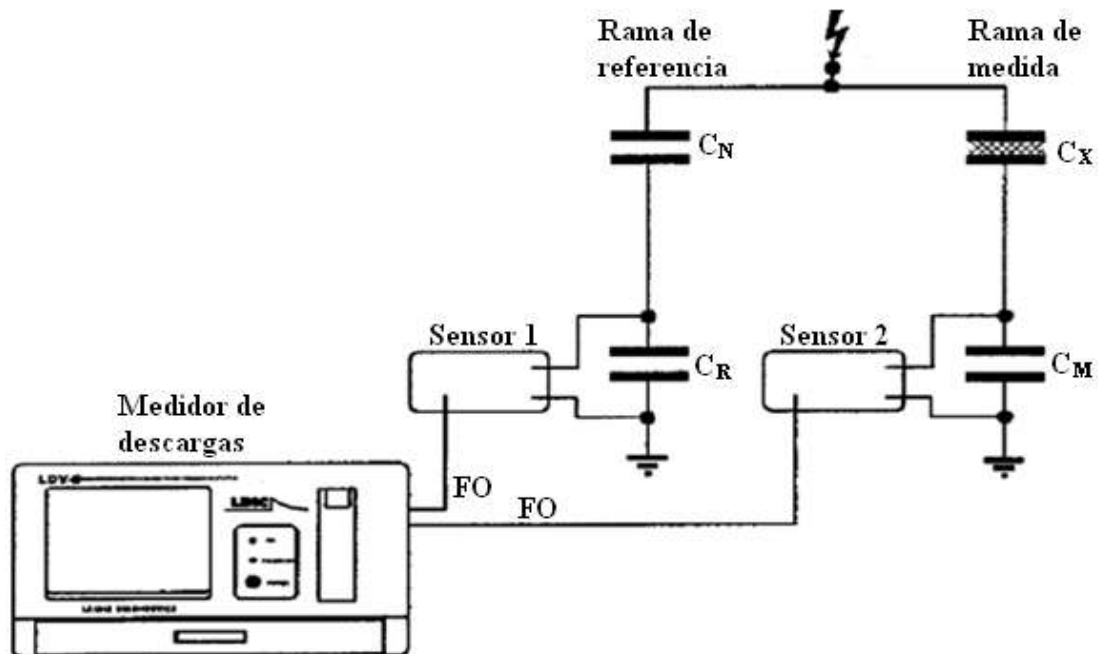


Figura 29: Esquema eléctrico del circuito de medida de tangente de delta.

- C_X : Objeto de ensayo.
- C_N : Condensador de SF_6 de 101 pF (idealmente sin pérdidas).



Figura 30: Montaje del ensayo de medida de tangente de delta.

A partir de este momento se van realizando las medidas de las diferentes muestras, simplemente cambiando la muestra en los electrodos utilizados siguiendo las medidas de seguridad, y todas a una misma tensión de 2 kV, la cual se establece como nominal para este ensayo. En este modulo se debe ajustar el “divider ratio” al valor establecido de 2.144×10^2 por utilizar el condensador de 1 nF como condensador de acoplamiento (según el manual de operación del equipo) [5]. Con este valor del “divider ratio” se puede cometer un error del 1% en la medida de la tensión.

3.3.1 COMPONENTES.

- Medidor de descargas (LDV-5) (figura 31).



Figura 31: Medidor de descargas (LDV-5).

- Módulo de control (SM-4-1) y regulador de tensión (LM-30-1) (figura 32).



Figura 32: Módulo de control (SM-4-1) y regulador de tensión (LM-30-1).

- Sensores dieléctricos (LDV-5) (figura 33).



Figura 33: Sensores dieléctricos (LDV-5).

- Electrodo de medida (figura 34).



Figura 34: Electrodo de medida.

- Condensador de SF₆ de 101 pF (figura 35).



Figura 35: Condensador de SF₆.

3.4 MEDIDA DE DESCARGAS PARCIALES.

El objetivo de este apartado es describir el procedimiento a seguir para realizar ensayos de tensión alterna en la detección y medición de descargas parciales. Los equipos necesarios para la realización de estos ensayos son el módulo de control (GLP1-e HV) y el medidor de descargas PDCheck [6].

En este caso se monta un circuito indirecto que se caracteriza porque la rama de detección se encuentra en paralelo con el objeto de ensayo (OT). El equipo PDCheck se suministra con un cuadripolo llamado PQ2 (C_Q) que trabaja en serie con un condensador de acoplamiento (C_A) (figuras 36 y 37).

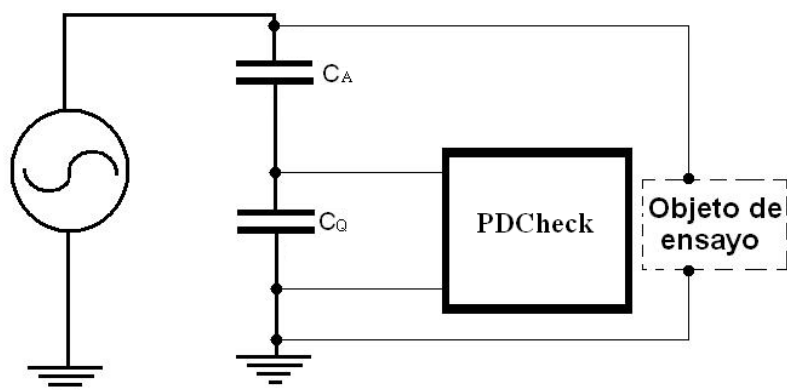


Figura 36: Esquema eléctrico del circuito indirecto de descargas parciales.



Figura 37: Montaje de ensayo de descargas parciales.

Para realizar la toma de medidas es necesario acceder al programa PDControl. Antes de comenzar a realizar medidas es necesario establecer correctamente en el programa la configuración del circuito que se está utilizando.

A partir de este momento se comienzan los ensayos de las 25 muestras. Los pasos a seguir con cada muestra son:

1. Ir subiendo tensión poco a poco mientras que se va ajustando el nivel de disparo en el programa para poder eliminar ruido y otras señales como corona, que no son el objetivo en esta prueba.
2. Cuando se vean las descargas por pantalla adquirir la forma de onda y comprobar que se tratan de descargas internas y anotar los valores máximos y medios de estas descargas.

3.4.1 COMPONENTES

- Medidor de descargas parciales PDCheck (figura 38).



Figura 38: PDCheck. Medidor de descargas parciales.

- Módulo de control (GLP1-e HV) (figura 39).



Figura 39: Módulo de control (GLP1-e HV).

- Cuadripolo (PQ2): su misión es proporcionar la señal de entrada y la de sincronización a la unidad de adquisición (figura 40).



Figura 40: Cuadripolo PQ2.

- Condensador de acoplamiento de 1 nF (figura 41).



Figura 41: Condensador de acoplamiento de 1 nF.

- Celda y electrodos de medidas (figura 42).



Figura 42: Electrodos y celda de medida.

- Transformador de corriente (HFCT) (figura 43).



Figura 43: Transformador de corriente (HFCT).

3.5 MEDIDA DE Tensión DE RUPTURA.

En este apartado se describe el proceso a seguir para realizar el ensayo de tensión de ruptura y el funcionamiento de los aparatos necesarios [7]. Los equipos que se usan para la ejecución de esta prueba son el módulo de control (SM-41) y el regulador de tensión (LM-30-1). El ensayo dieléctrico de tensión de descarga disruptiva asegurada consiste en aplicar y aumentar de forma continua la tensión hasta que se produzca una descarga disruptiva en el objeto a ensayar. Se debe registrar la tensión a la cual se produce dicha descarga disruptiva.

Los factores a tener en cuenta son:

- Partir de una tensión suficientemente baja para evitar fenómenos transitorios de conexión.
- Aumentar la tensión según la velocidad especificada por el Comité Técnico correspondiente
- Repetir la aplicación de tensión el número de veces especificado por el Comité Técnico correspondiente.

Se realiza el montaje del sistema de acuerdo al esquema mostrado en la figura 44. Además en la figura 45 se muestra una imagen del montaje ya realizado.

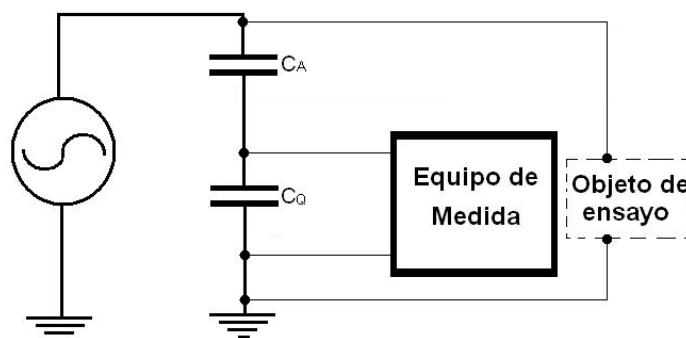


Figura 44: Esquema eléctrico del circuito de ensayo de tensión de ruptura.

- C_A : Condensador de acoplamiento de 1 nF.
- C_Q : Cuadripolo (LDM5) (impedancia de medida de 210 nF).

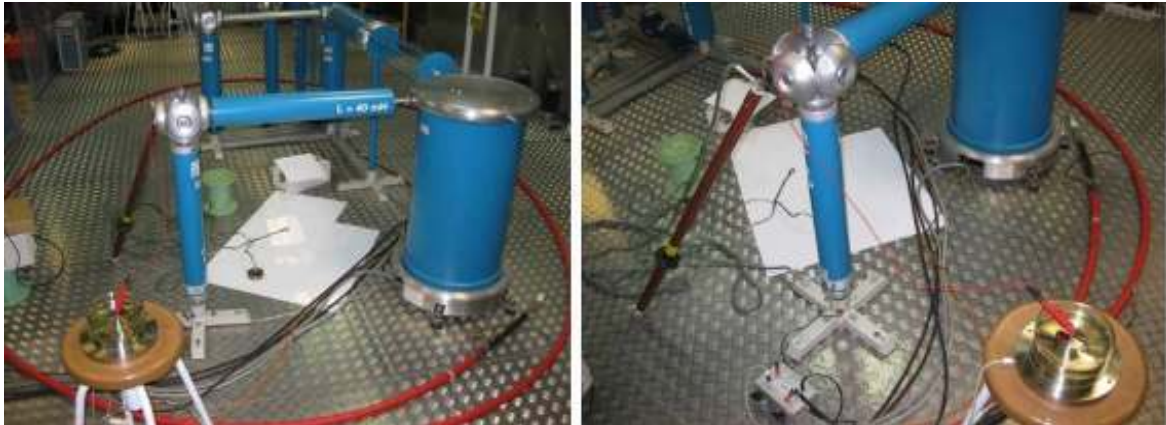


Figura 45: Montaje de ensayo de tensión de ruptura.

La celda debe estar llena de aceite para prevenir arco eléctrico a través del aire porque se está trabajando con tensiones altas.

El módulo (SM-41) permite configurar toda la secuencia de operaciones y realizarla de manera automática. En este caso se decide hacer la subida de tensión de manera manual.

La siguiente tabla da valores aconsejables para la velocidad de subida de la tensión. Estos valores aseguran que la velocidad no sea excesivamente lenta, ni tan rápida que no se pueda controlar (tabla 2) [7].

| Tensión del ensayo [kV] | 0-5 | 6-20 | 21-35 | 36-50 | 50-75 | 75-100 |
|------------------------------------|-----|------|-------|-------|-------|--------|
| Máxima velocidad de subida hasta % | 0 | 0 | 50 | 75 | 75 | 85 |
| Velocidad de subida [kV/s] | 0,5 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3 |

Tabla 2: Velocidad de subida de tensión aconsejada en función de la tensión de ensayo.

En este caso como las tensiones deben estar alrededor de los 20 kV pues se sube la tensión desde la tensión mínima a una velocidad 1,5 kV/s.

Se repite el ensayo una vez para cada muestra para comprobar si efectivamente la muestra ha roto.

3.5.1 COMPONENTES

- Módulo de control (SM-41) y regulador de tensión (LM-30-1) (figura 46).



Figura 46: Módulo de control (SM-41) y regulador de tensión (LM-30-1).

- Impedancia de medida (LDM5) (figura 47).



Figura 47: Impedancia de medida (LDM5).

- Celda y electrodos de medida (figura 48).



Figura 48: Celda y electrodos de medida.

- Condensador de acoplamiento (figura 49).



Figura 49: Condensador de acoplamiento.

Capítulo IV

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 ENVEJECIMIENTO.

A continuación se muestra una imagen de una muestra de cada uno de los grupos de estudio ordenada de menor a mayor tiempo de envejecimiento porque resulta muy interesante ver la evolución de la apariencia física del material en función del tiempo que ha estado sometido a tensión (figura 50).

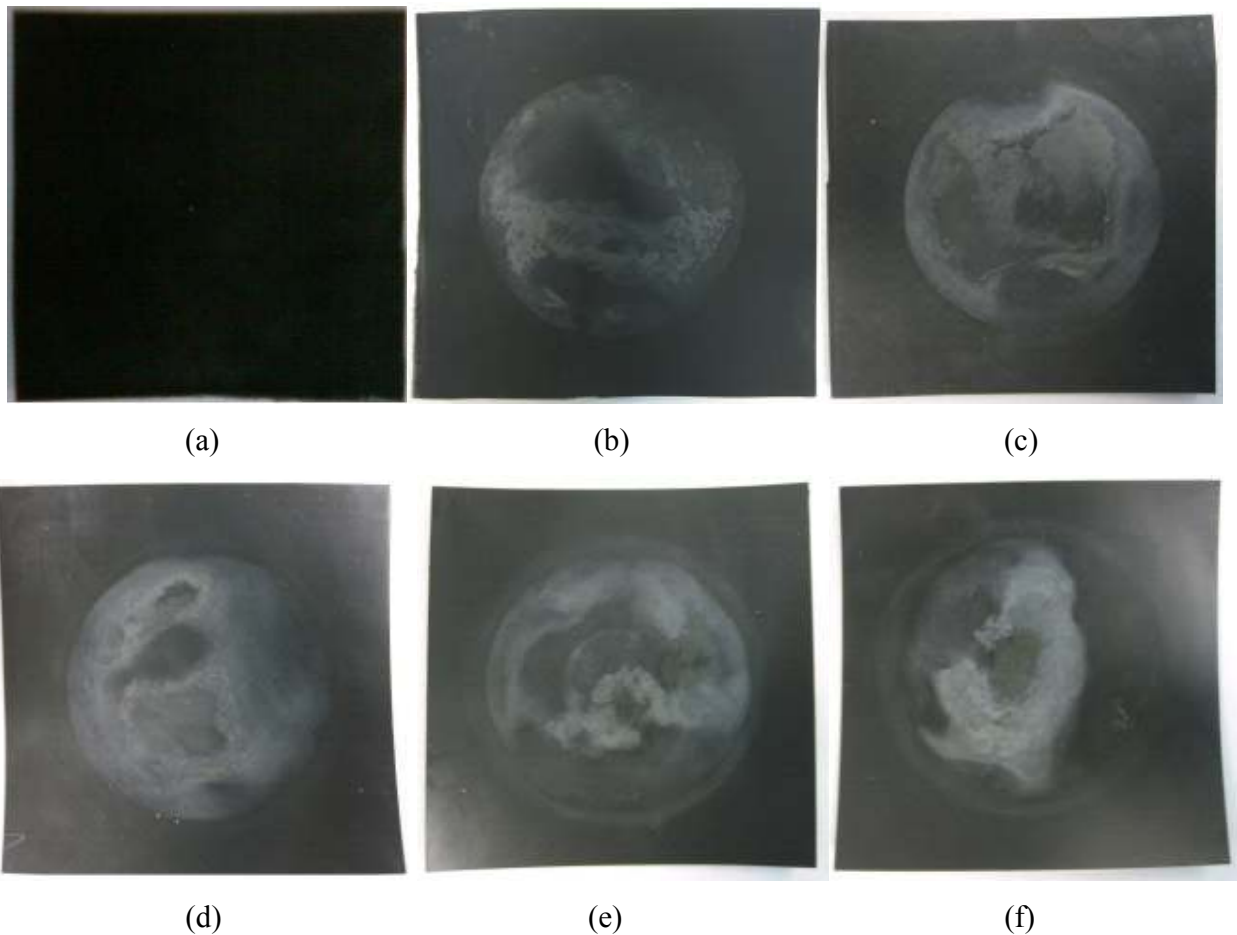


Figura 50: Muestras ordenadas de menor a mayor tiempo de envejecimiento: [(a): sin envejecimiento; (b): 15 días; (c): 30 días; (d): 45 días; (e): 60 días; (f): 75 días].

Se observa claramente como a medida que pasa el tiempo el deterioro físico va en aumento en la superficie en contacto con los electrodos. También se observa como el desgaste no es uniforme en toda la superficie que ocupaba el electrodo.

Pasados 15 días se retiran las primeras 5 muestras y la apariencia que tienen los electrodos y la lámina de cobre, es la que su muestra en las figuras 51 y 52.



Figura 51: Electrodos de muestras 1 a 5.

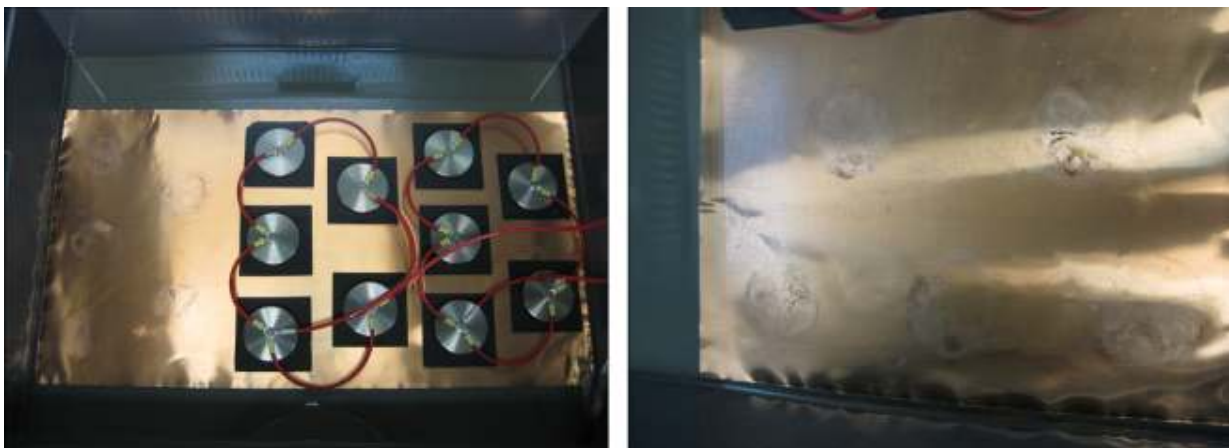


Figura 52: Desgaste del cobre, muestras 1 a 5.

Se aprecia un ligero desgaste en la superficie que ha sufrido más presión del electrodo y una fina capa de residuos causada por la existencia de efecto corona y la presencia de aceite como aislante.

A continuación se muestran los siguientes 5 electrodos con envejecimiento de 30 días, junto con la lámina de cobre (figuras 53 y 54).



Figura 53: Electrodos de muestras 6 a 10.

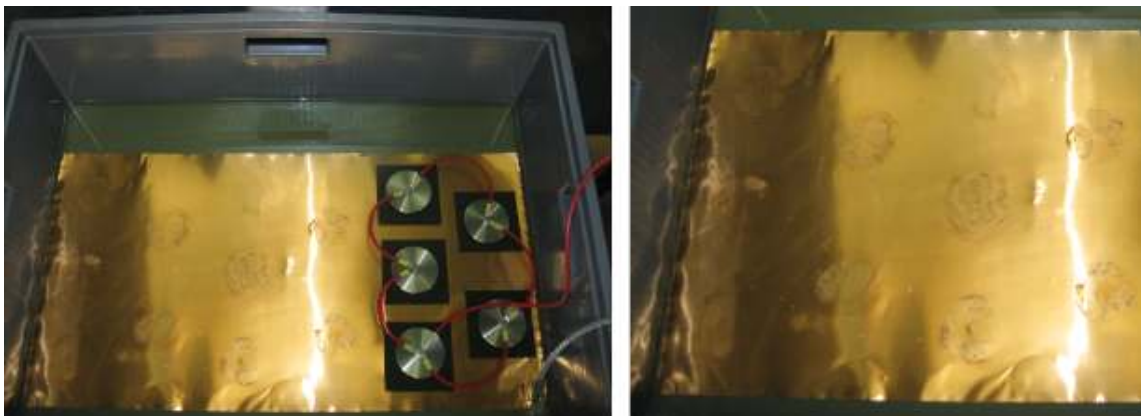


Figura 54: Desgaste del cobre, muestras 6 a 10.

La degradación es similar al caso anterior aunque ya se observa como algunas muestras tienen mejor aspecto que otras.

Las siguientes imágenes corresponden a los 5 electrodos que han permanecido 45 días a tensión y la lámina de cobre (figuras 55 y 56).



Figura 55: Electrodos de muestras 11 a 15.



Figura 56: Desgaste del cobre muestras 11 a 15.

La capa de residuos formada a causa del efecto corona se aprecia más a medida que pasa el tiempo. La apariencia del material es más o menos similar que las anteriores y también ocurre que físicamente no todas las muestras han sufrido de la misma manera. Si que se aprecia que las marcas dejadas en el cobre son cada vez mayores.

A los 60 días se retira el siguiente grupo de muestras y se muestra el desgaste de la lámina de cobre y el de los electrodos en las figuras 57.



Figura 57: Electrodo de muestras 16 a20.

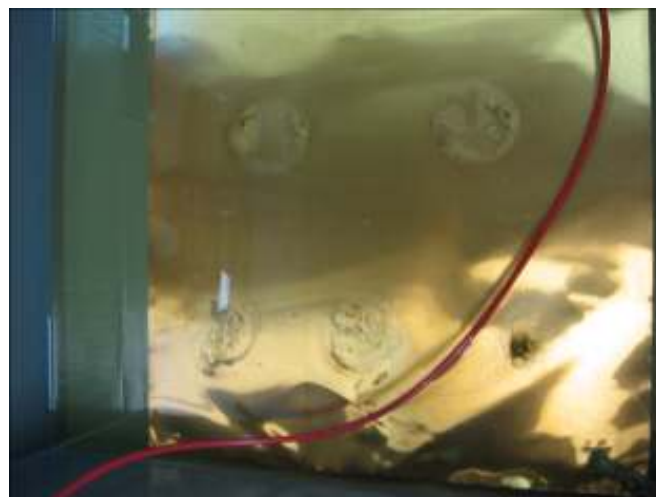


Figura 58: Desgaste del cobre muestras 16 a20.

Superficialmente se nota una degradación importante en la zona del electrodo. Hay una capa de residuos considerable tanto en el cobre como en los electrodos. Algunas muestra tiene bastante mejor aspecto que otras.

Por último se muestran los 5 electrodos que han estado 75 días a la misma tensión, junto con el cobre (figuras 59 y 60).



Figura 59: Electrodos de muestras 21 a 25.

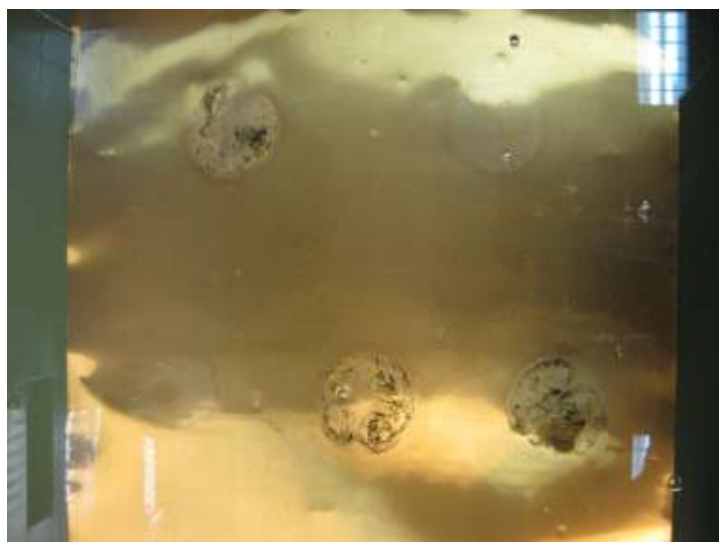


Figura 60: Desgaste del cobre muestras 21 a 25.



Al igual que en los casos anteriores, hay una capa de residuos considerable tanto en las muestras como en los electrodos y en el cobre. También se aprecia un desgaste superficial importante en las muestras en la zona de contacto con el electrodo.

En líneas generales se puede decir que con el tiempo la degradación de las muestras es mayor, aunque ya es bastante notoria desde la primera retirada de muestras, siendo en adelante más lenta esa degradación. El material se estropea bastante por lo menos en apariencia física en periodos no tan largos de tiempo, puesto que el envejecimiento duró 75 días.

La aparición de la capa de residuos a causa del efecto corona existente, si aumenta considerablemente con el tiempo y esto se aprecia muy bien en la cara del electrodo en contacto con el material y también en el cobre. Asimismo se observa que hay ciertas muestras con el mismo tiempo de envejecimiento que se degradaron bastante menos que el resto aunque las condiciones fueron las mismas que las de las demás. Esto puede ser debido a que el efecto corona no es un fenómeno uniforme por lo que es posible que no aparezca de la misma manera en todos los electrodos.

Ahora falta comprobar si esta degradación física se corresponde también con una degradación de las propiedades dieléctricas del material.

4.2 RESISTENCIA SUPERFICIAL Y VOLUMÉTRICA.

Primero se presentan los resultados de las pruebas hechas a las muestras sin envejecer (tabla 3). En este caso se obtienen datos de todas las muestras por ser un método muy sencillo y repetitivo.

| Muestras | Resistencia volumétrica [GΩ] | Resistencia superficial [TΩ] |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 3,41020 | 1,18852 |
| 2 | 3,05348 | 1,14855 |
| 3 | 3,55223 | 1,32651 |
| 4 | 3,42680 | 1,37566 |
| 5 | 3,48058 | 1,25855 |
| 6 | 3,65327 | 1,07970 |
| 7 | 3,20571 | 1,06589 |
| 8 | 3,19951 | 1,57697 |
| 9 | 3,35894 | 1,17738 |
| 10 | 3,02557 | 1,45660 |
| 11 | 3,11146 | 1,69444 |
| 12 | 3,47505 | 1,28794 |
| 13 | 3,70434 | 1,35082 |
| 14 | 3,28324 | 1,62721 |
| 15 | 3,68552 | 1,18731 |
| 16 | 3,41166 | 1,19704 |
| 17 | 3,57053 | 1,09056 |
| 18 | 3,61089 | 1,15393 |
| 19 | 3,70828 | 1,08695 |
| 20 | 3,39687 | 1,30695 |
| 21 | 3,56685 | 1,10675 |
| 22 | 3,51559 | 1,29266 |
| 23 | 3,25184 | 1,71980 |
| 24 | 3,72637 | 1,31276 |
| 25 | 4,17182 | 0,99973 |
| | $\bar{R}_v = 3,46226$ [GΩ] | $\bar{R}_s = 1,28277$ [TΩ] |
| | $\sigma = 0,25400$ [GΩ] | $\sigma = 0,54676$ [TΩ] |

Tabla 3: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las 25 muestras sin envejecer.

Ahora se presentan los resultados de las muestras envejecidas ordenadas según el tiempo de envejecimiento (tablas 4, 5, 6, 7 y 8).



| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Resistencia volumétrica [GΩ] | Resistencia superficial [GΩ] |
|---------------------------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 15 | 1 | 4,60564 | 681,984 |
| 15 | 2 | 2,66579 | 296,809 |
| 15 | 3 | 3,01531 | 522,929 |
| 15 | 4 | 3,41742 | 383,286 |
| 15 | 5 | 3,66574 | 578,822 |
| | | $\bar{R}_v = 3,34198 \text{ [GΩ]}$ | $\bar{R}_s = 492,766 \text{ [GΩ]}$ |
| | | $\sigma = 0,73895 \text{ [GΩ]}$ | $\sigma = 153,707 \text{ [GΩ]}$ |

Tabla 4: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las 5 primeras muestras envejecidas.

Se observa que la muestra 2 tiene unos valores significativamente inferiores a los demás aunque consultado las muestras no se aprecia mayor desgaste que en el resto.

| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Resistencia volumétrica [GΩ] | Resistencia superficial [GΩ] |
|---------------------------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 30 | 6 | 3,48015 | 278,863 |
| 30 | 7 | 2,84210 | 384,062 |
| 30 | 8 | 3,14587 | 445,400 |
| 30 | 9 | 2,97437 | 311,112 |
| 30 | 10 | 2,38834 | 208,876 |
| | | $\bar{R}_v = 2,96617 \text{ [GΩ]}$ | $\bar{R}_s = 325,063 \text{ [GΩ]}$ |
| | | $\sigma = 0,40181 \text{ [GΩ]}$ | $\sigma = 91,908 \text{ [GΩ]}$ |

Tabla 5: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las muestras 6 a 10 envejecidas.

La muestra 10 tiene unos valores más bajos que las demás pero observando la muestra no se aprecia un desgaste más importante que en el resto.

| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Resistencia volumétrica [GΩ] | Resistencia superficial [GΩ] |
|---------------------------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 45 | 11 | 2,10713 | 284,405 |
| 45 | 12 | 1,97621 | 280,930 |
| 45 | 13 | 3,78694 | 360,373 |
| 45 | 14 | 2,43236 | 218,229 |
| 45 | 15 | 3,06332 | 295,927 |
| | | $\bar{R}_v = 2,67247 \text{ [GΩ]}$ | $\bar{R}_s = 287,973 \text{ [GΩ]}$ |
| | | $\sigma = 0,75114 \text{ [GΩ]}$ | $\sigma = 50,576 \text{ [GΩ]}$ |

Tabla 6: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las muestras 11 a 15 envejecidas.



La muestra 13 presenta unos valores significativamente más altos que el resto probablemente debido a que ha sufrido menos desgaste puesto que tiene muy buen aspecto físico. Las muestra 15 también presenta buen aspecto y sus valores también son un poco más altos.

| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Resistencia volumétrica [GΩ] | Resistencia superficial [GΩ] |
|---------------------------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 60 | 16 | 2,69913 | 117,754 |
| 60 | 17 | 1,92266 | 215,977 |
| 60 | 18 | 3,38619 | 280,465 |
| 60 | 19 | 2,06290 | 166,953 |
| 60 | 20 | 2,74257 | 126,961 |
| | | $\bar{R}_v = 2,56269 \text{ [GΩ]}$ | $\bar{R}_s = 181,622 \text{ [GΩ]}$ |
| | | $\sigma = 0,58918 \text{ [GΩ]}$ | $\sigma = 67,514 \text{ [GΩ]}$ |

Tabla 7: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las muestras 16 a 20 envejecidas.

Se observa que la muestra 18 tiene unos valores bastante más altos que las demás muestras lo que corresponde con un mejor aspecto físico que el resto.

| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Resistencia volumétrica [GΩ] | Resistencia superficial [GΩ] |
|---------------------------------|----------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 75 | 21 | 2,41317 | 34,9523 |
| 75 | 22 | 2,20238 | 15,9872 |
| 75 | 23 | 2,04830 | 5,41153 |
| 75 | 24 | 2,16254 | 12,7762 |
| 75 | 25 | 2,65163 | 114,832 |
| | | $\bar{R}_v = 2,29560 \text{ [GΩ]}$ | $\bar{R}_s = 36,792 \text{ [GΩ]}$ |
| | | $\sigma = 0,23882 \text{ [GΩ]}$ | $\sigma = 44,966 \text{ [GΩ]}$ |

Tabla 8: Valores de resistencia volumétrica y superficial de las muestras 21 a 25 envejecidas.

Las muestras 25 y 21 presentan unos valores notoriamente más altos, y un aspecto bastante mejor que el resto.

Los valores de resistencia superficial varían mucho incluso entre los que han estado el mismo tiempo a tensión. Esto puede ser debido a la capa de residuos existente en la superficie del material, probablemente formada por compuestos a base de carbono originados por la descomposición del aceite y la erosión del material, lo que aumenta la

conductividad eléctrica. La corriente superficial depende directamente, entre otros factores, del estado de la superficie del material. Esta variabilidad se explica debido a que el estado de la superficie de las muestras no es uniforme, habiendo mucha diferencia entre unas muestras y otras.

Los valores de resistencia superficial son los que más varían con respecto a los valores iniciales. Hay una disminución drástica en el primer grupo de muestras y luego los valores de los siguientes grupos disminuyen más lentamente a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento, como se observa en la siguiente gráfica (figura 61).

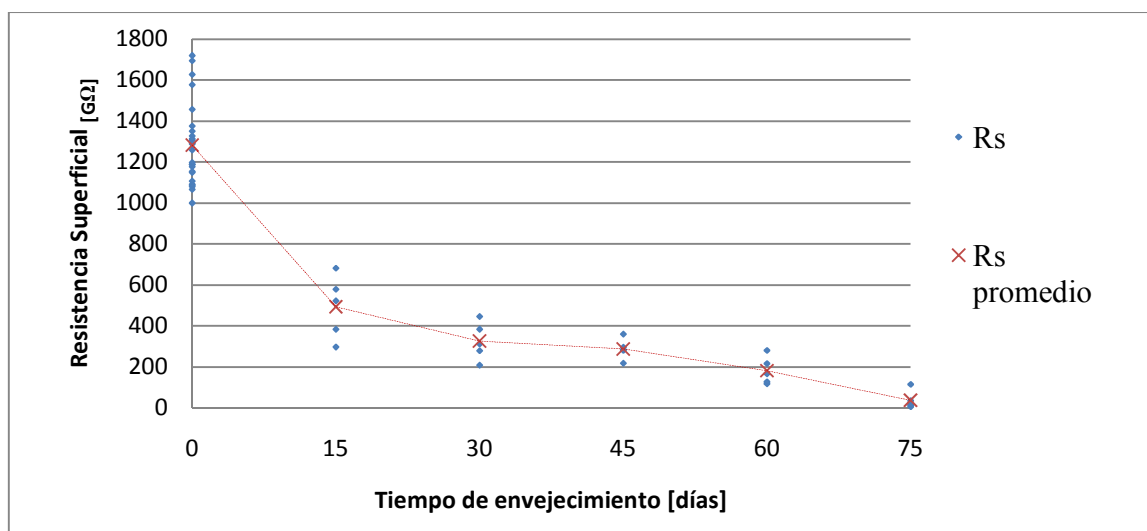


Figura 61: Representación de la resistencia superficial de las 25 muestras en función del tiempo de envejecimiento.

Los valores de resistencia volumétrica son más estables que los de resistencia superficial. Esto tiene su explicación en que la corriente volumétrica es la corriente que circula por todo el volumen del dieléctrico por lo que no depende de los residuos de la superficie y si de otras propiedades internas del material.

Analizando los valores medios obtenidos en cada grupo de muestras también se observa una disminución de la resistencia volumétrica en función del tiempo de envejecimiento, como se muestra en la siguiente gráfica (figura 62).

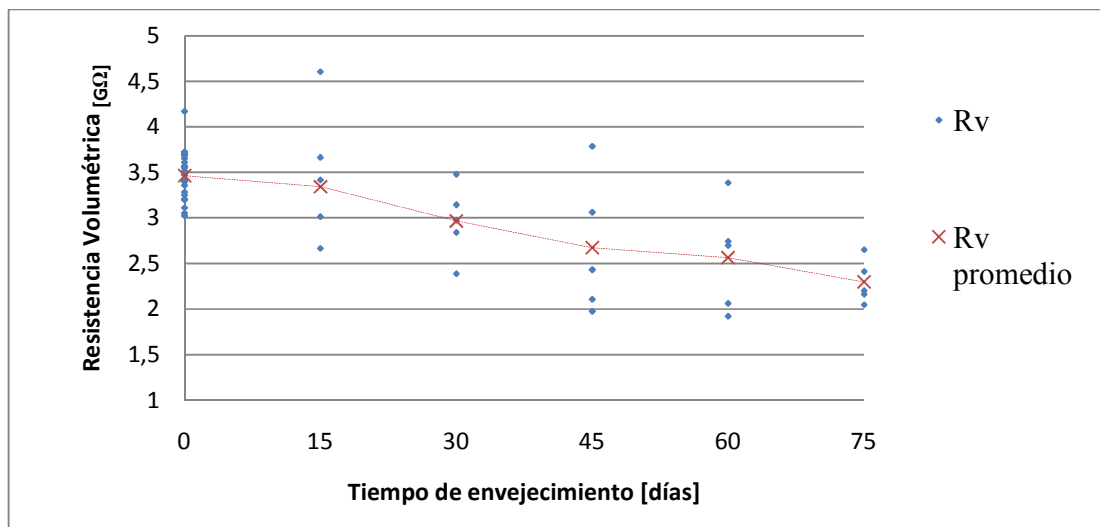


Figura 62: Representación de la resistencia volumétrica de las 25 muestras en función del tiempo de envejecimiento.

Los valores de resistencia decrecen considerablemente si atendemos al tiempo de ensayos puesto que los valores finales en el caso de la resistencia volumétrica son un 30% menores que los valores iniciales y en el caso de la resistencia superficial decrecen más de un 90 %. El valor de resistencia superficial se ve muy influenciado por la acción degradante del efecto corona existente.

4.3 TANGENTE DE DELTA Y PERMITIVIDAD.

En este caso se han cogido 5 muestras al azar entre todas las muestras sin envejecer, para ser representativas de los valores iniciales (tabla 9).

| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Tensión de prueba [kV] | Capacitancia [pF] | Tangente de delta |
|---------------------------------|----------|------------------------|--------------------------|---|
| 0 | 2 | 2,10 | 161,986 | $9,66 \cdot 10^{-2}$ |
| 0 | 7 | 2,11 | 168,543 | $9,59 \cdot 10^{-2}$ |
| 0 | 13 | 2,09 | 164,482 | $9,62 \cdot 10^{-2}$ |
| 0 | 16 | 2,03 | 164,871 | $9,61 \cdot 10^{-2}$ |
| 0 | 24 | 2,08 | 167,733 | $9,59 \cdot 10^{-2}$ |
| | | $\bar{V} = 2,08$ [kV] | $\bar{C} = 165,523$ [pF] | $\overline{\tan \delta} = 9,61 \cdot 10^{-2}$ |
| | | | $\sigma = 2,648$ [pF] | $\sigma = 2,88 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 9: Valores de $\tan \delta$ de 5 muestras aleatorias sin envejecer.

También se quiere hallar el valor de permitividad y de permitividad relativa del dieléctrico utilizando las ecuaciones mencionadas con anterioridad en el apartado 2.3. Para estos cálculos se toman los valores medios de cada grupo de muestras y las medidas de las muestras citadas en el apartado 3.1.

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{A} = \frac{165,523 \cdot 10^{-12} \cdot 1,35 \cdot 10^{-3}}{(10 \cdot 10^{-2})^2} = 2,234 \cdot 10^{-11} \text{ [F/m]}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{2,234 \cdot 10^{-11}}{8,854 \cdot 10^{-12}} = 2,523$$

Ahora se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de las muestras envejecidas, ordenados de menor a mayor tiempo de envejecimiento (tablas 10, 11, 12, 13 y 14), acompañados de los cálculos de las permitividades.

| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Tensión de prueba [kV] | Capacitancia [pF] | Tangente de delta |
|---------------------------------|----------|-------------------------------|---|--|
| 15 | 1 | 2,08 | 157,870 | $9,57 \cdot 10^{-2}$ |
| 15 | 2 | 2,22 | 176,716 | $1,04 \cdot 10^{-1}$ |
| 15 | 3 | 2,07 | 166,528 | $9,70 \cdot 10^{-2}$ |
| 15 | 4 | 2,07 | 167,650 | $9,29 \cdot 10^{-2}$ |
| 15 | 5 | 2,12 | 157,079 | $9,59 \cdot 10^{-2}$ |
| | | $\bar{V} = 2,11 \text{ [kV]}$ | $\bar{C} = 165,149 \text{ [pF]}$ $\sigma = 8,063 \text{ [pF]}$ | $\overline{\tan \delta} = 9,71 \cdot 10^{-2}$ $\sigma = 4,12 \cdot 10^{-3}$ |

Tabla 10: Valores de $\tan \delta$ de las muestras 1 a 5 envejecidas.

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{A} = \frac{165,149 \cdot 10^{-12} \cdot 1,35 \cdot 10^{-3}}{(10 \cdot 10^{-2})^2} = 2,229 \cdot 10^{-11} \text{ [F/m]}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{2,229 \cdot 10^{-11}}{8,854 \cdot 10^{-12}} = 2,517$$



| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Tensión de prueba [kV] | Capacitancia [pF] | Tangente de delta |
|---------------------------------|----------|------------------------|--------------------------|---|
| 30 | 6 | 2,06 | 156,135 | $9,65 \cdot 10^{-2}$ |
| 30 | 7 | 2,10 | 161,435 | $9,85 \cdot 10^{-2}$ |
| 30 | 8 | 2,09 | 160,661 | $9,79 \cdot 10^{-2}$ |
| 30 | 9 | 2,07 | 162,899 | $1,00 \cdot 10^{-1}$ |
| 30 | 10 | 2,10 | 160,207 | $9,86 \cdot 10^{-2}$ |
| | | $\bar{V} = 2,08$ [kV] | $\bar{C} = 160,467$ [pF] | $\overline{\tan \delta} = 9,81 \cdot 10^{-2}$ |
| | | | $\sigma = 2,526$ [pF] | $\sigma = 1,27 \cdot 10^{-3}$ |

Tabla 11: Valores de $\tan \delta$ de las muestras 6 a 10 envejecidas.

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{A} = \frac{160,467 \cdot 10^{-12} \cdot 1,35 \cdot 10^{-3}}{(10 \cdot 10^{-2})^2} = 2,166 \cdot 10^{-11} \text{ [F/m]}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{2,166 \cdot 10^{-11}}{8,854 \cdot 10^{-12}} = 2,446$$

| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Tensión de prueba [kV] | Capacitancia [pF] | Tangente de delta |
|---------------------------------|----------|------------------------|--------------------------|---|
| 45 | 11 | 2,10 | 161,600 | $9,78 \cdot 10^{-2}$ |
| 45 | 12 | 2,11 | 160,570 | $9,80 \cdot 10^{-2}$ |
| 45 | 13 | 2,10 | 160,279 | $9,81 \cdot 10^{-2}$ |
| 45 | 14 | 2,13 | 156,826 | $9,79 \cdot 10^{-2}$ |
| 45 | 15 | 2,12 | 152,826 | $1,00 \cdot 10^{-1}$ |
| | | $\bar{V} = 2,11$ [kV] | $\bar{C} = 160,420$ [pF] | $\overline{\tan \delta} = 9,83 \cdot 10^{-2}$ |
| | | | $\sigma = 3,606$ [pF] | $\sigma = 9,24 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 12: Valores de $\tan \delta$ de las muestras 11 a 15 envejecidas.

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{A} = \frac{160,420 \cdot 10^{-12} \cdot 1,35 \cdot 10^{-3}}{(10 \cdot 10^{-2})^2} = 2,165 \cdot 10^{-11} \text{ [F/m]}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{2,165 \cdot 10^{-11}}{8,854 \cdot 10^{-12}} = 2,445$$



| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Tensión de prueba [kV] | Capacitancia [pF] | Tangente de delta |
|---------------------------------|----------|------------------------|---|--|
| 60 | 16 | 2,13 | 155,618 | $1,00 \cdot 10^{-1}$ |
| 60 | 17 | 2,12 | 154,337 | $9,86 \cdot 10^{-2}$ |
| 60 | 18 | 2,12 | 160,081 | $9,80 \cdot 10^{-2}$ |
| 60 | 19 | 2,13 | 153,236 | $9,87 \cdot 10^{-2}$ |
| 60 | 20 | 2,13 | 152,100 | $9,88 \cdot 10^{-2}$ |
| | | $\bar{V} = 2,12$ [kV] | $\bar{C} = 155,074$ [pF] $\sigma = 3,087$ [pF] | $\overline{\tan\delta} = 9,89 \cdot 10^{-2}$ $\sigma = 7,294 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 13: Valores de $\tan\delta$ de las muestras 16 a 20 envejecidas.

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{A} = \frac{155,074 \cdot 10^{-12} \cdot 1,35 \cdot 10^{-3}}{(10 \cdot 10^{-2})^2} = 2,093 \cdot 10^{-11} \text{ [F/m]}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{2,093 \cdot 10^{-11}}{8,854 \cdot 10^{-12}} = 2,364$$

| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Tensión de prueba [kV] | Capacitancia [pF] | Tangente de delta |
|---------------------------------|----------|------------------------|---|---|
| 75 | 21 | 2,10 | 139,385 | $1,23 \cdot 10^{-1}$ |
| 75 | 22 | 2,12 | 140,024 | $1,25 \cdot 10^{-1}$ |
| 75 | 23 | 2,08 | 143,238 | $1,22 \cdot 10^{-1}$ |
| 75 | 24 | 2,10 | 141,458 | $1,18 \cdot 10^{-1}$ |
| 75 | 25 | 2,11 | 151,726 | $1,12 \cdot 10^{-1}$ |
| | | $\bar{V} = 2,10$ [kV] | $\bar{C} = 143,184$ [pF] $\sigma = 5,009$ [pF] | $\overline{\tan\delta} = 1,20 \cdot 10^{-1}$ $\sigma = 5,15 \cdot 10^{-3}$ |

Tabla 14: Valores de $\tan\delta$ de las muestras 21 a 25 envejecidas.

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{A} = \frac{143,184 \cdot 10^{-12} \cdot 1,35 \cdot 10^{-3}}{(10 \cdot 10^{-2})^2} = 1,933 \cdot 10^{-11} \text{ [F/m]}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1,933 \cdot 10^{-11}}{8,854 \cdot 10^{-12}} = 2,183$$

Los valores de capacidad y de permitividad van disminuyendo mientras que el valor de la tangente de delta va aumentando cuanto mayor es el tiempo de envejecimiento del material (figuras 63 y 64).

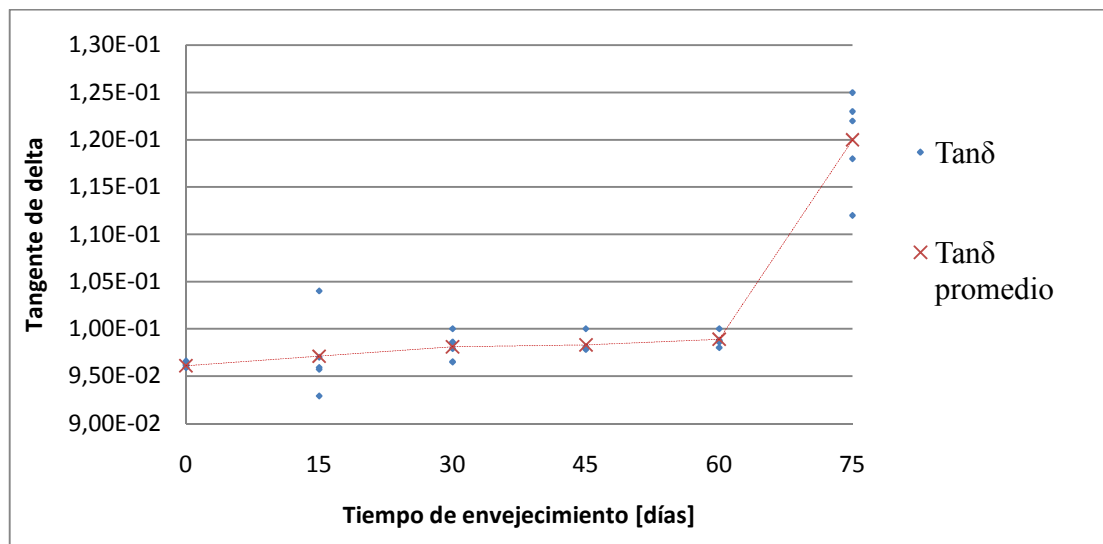


Figura 63: Representación de la evolución de la $\tan\delta$ en función del tiempo de envejecimiento.

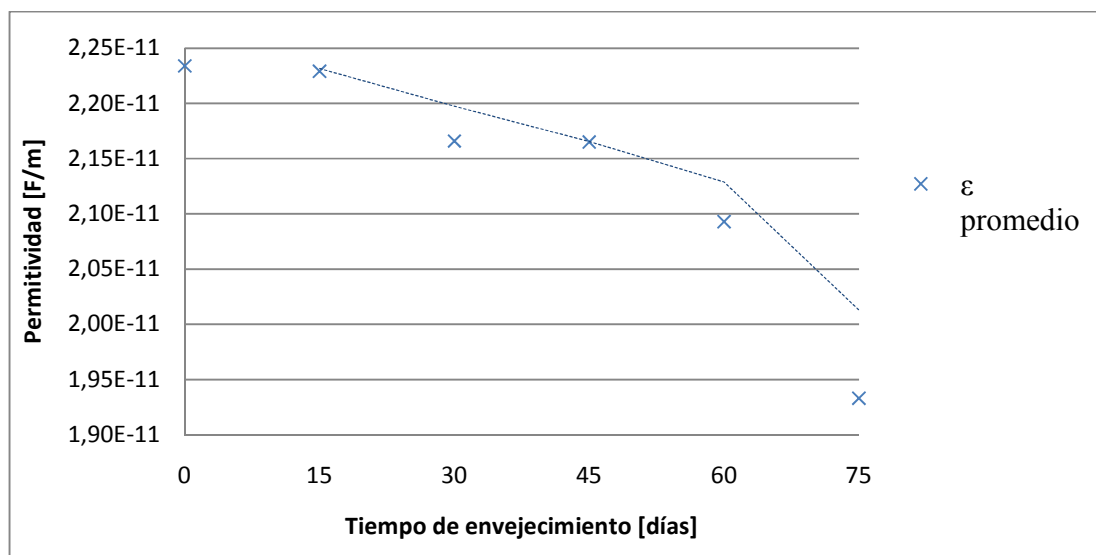


Figura 64: Representación de la evolución de la permitividad en función del tiempo de envejecimiento.

En la figura 63 se observa que hasta 60 días la tangente de delta tiene un comportamiento bastante constante, aunque con un ligero aumento. A partir de ese momento el aumento de produce de una manera mucho más rápida. El valor de la tangente de delta a los 75 días es un 25% mayor que el valor inicial.

En la figura 64 se observa que la permitividad va disminuyendo a medida que pasa el tiempo, decreciendo más rápidamente a partir de 60 días. Al final del proceso de envejecimiento la disminución es de un 20% aproximadamente.

4.4 DESCARGAS PARCIALES.

Cuando se realizó el primer ensayo de descargas parciales se decidió medir las descargas que podía haber a una tensión de 6,5kV, elegida como tensión de prueba, en 5 muestras sin envejecer elegidas al azar. En la tabla 15 se muestran los valores obtenidos en estas condiciones.

| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Tensión de prueba [kV] | Tensión media de las descargas internas [V] |
|---------------------------------|----------|--------------------------------|---|
| 0 | 4 | 6,533 | $7 \cdot 10^{-3}$ |
| 0 | 12 | 6,725 | $9 \cdot 10^{-3}$ |
| 0 | 17 | 6,628 | 0 |
| 0 | 19 | 6,703 | $11 \cdot 10^{-3}$ |
| 0 | 23 | 6,691 | $6 \cdot 10^{-3}$ |
| | | $\bar{V} = 6,656 \text{ [kV]}$ | $\bar{V} = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ [kV]}$ $\sigma = 4,16 \cdot 10^{-3}$ |

Tabla 15: Valores de descargas parciales de 5 muestras al azar sin envejecer.

En el momento de la realización del ensayo a las muestras envejecidas, se decide determinar la tensión a la que aparecen descargas parciales internas y la tensión a la que desaparecen dichas descargas en el objeto de ensayo.

A continuación se muestran los valores obtenidos (tabla 16), así como unas gráficas donde se puede ver la evolución de la tensión de irrupción y extinción de las descargas parciales y de la tensión media de éstas en función del tiempo de envejecimiento (figuras 65 y 66).



| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Tensión de irrupción [kV] | Tensión de extinción [kV] | Tensión media de las descargas internas [V] |
|---------------------------------|----------|--|--|---|
| 15 | 1 | 7,446 | 4,385 | $10,8 \cdot 10^{-3}$ |
| 15 | 2 | 6,735 | 4,543 | $10,4 \cdot 10^{-3}$ |
| 15 | 3 | 7,293 | 4,843 | $5,2 \cdot 10^{-3}$ |
| 15 | 4 | 5,579 | 3,200 | $7,1 \cdot 10^{-3}$ |
| 15 | 5 | 7,407 | 6,000 | $4,2 \cdot 10^{-3}$ |
| | | $\bar{V} = 6,892$ [kV] $\sigma = 0,788$ | $\bar{V} = 4,594$ [kV] $\sigma = 1,003$ | $\bar{V} = 8,4 \cdot 10^{-3}$ [kV] $\sigma = 3,0 \cdot 10^{-3}$ |
| 30 | 6 | 4,288 | 2,858 | $13,8 \cdot 10^{-3}$ |
| 30 | 7 | 6,808 | 4,896 | $8,9 \cdot 10^{-3}$ |
| 30 | 8 | 6,677 | 4,104 | $6,3 \cdot 10^{-3}$ |
| 30 | 9 | 8,887 | 5,640 | $7,5 \cdot 10^{-3}$ |
| 30 | 10 | 6,798 | 4,535 | $4,9 \cdot 10^{-3}$ |
| | | $\bar{V} = 6,692$ [kV] $\sigma = 1,629$ | $\bar{V} = 4,406$ [kV] $\sigma = 1,137$ | $\bar{V} = 8,3 \cdot 10^{-3}$ [kV] $\sigma = 3,4 \cdot 10^{-3}$ |
| 45 | 11 | 6,320 | 3,879 | $8,1 \cdot 10^{-3}$ |
| 45 | 12 | 7,719 | 3,545 | $15,5 \cdot 10^{-3}$ |
| 45 | 13 | 7,173 | 5,494 | $11,6 \cdot 10^{-3}$ |
| 45 | 14 | 6,382 | 2,202 | $15,4 \cdot 10^{-3}$ |
| 45 | 15 | 6,921 | 5,110 | $9,5 \cdot 10^{-3}$ |
| | | $\bar{V} = 6,903$ [kV] $\sigma = 0,581$ | $\bar{V} = 4,010$ [kV] $\sigma = 1,314$ | $\bar{V} = 12,0 \cdot 10^{-3}$ [kV] $\sigma = 3,4 \cdot 10^{-3}$ |
| 60 | 16 | 5,260 | 3,234 | $6,4 \cdot 10^{-3}$ |
| 60 | 17 | 6,535 | 4,420 | $7,1 \cdot 10^{-3}$ |
| 60 | 18 | 6,309 | 4,377 | $12,3 \cdot 10^{-3}$ |
| 60 | 19 | 7,101 | 4,848 | $10,3 \cdot 10^{-3}$ |
| 60 | 20 | 6,876 | 4,665 | $7,2 \cdot 10^{-3}$ |
| | | $\bar{V} = 6,416$ [kV] $\sigma = 0,715$ | $\bar{V} = 4,309$ [kV] $\sigma = 0,630$ | $\bar{V} = 8,7 \cdot 10^{-3}$ [kV] $\sigma = 2,5 \cdot 10^{-3}$ |
| 75 | 21 | 7,101 | 4,623 | $15,7 \cdot 10^{-3}$ |
| 75 | 22 | 5,979 | 4,865 | $13,6 \cdot 10^{-3}$ |
| 75 | 23 | 6,240 | 3,420 | $11,1 \cdot 10^{-3}$ |
| 75 | 24 | 6,735 | 4,173 | $10,4 \cdot 10^{-3}$ |
| 75 | 25 | 5,708 | 3,452 | $8,8 \cdot 10^{-3}$ |
| | | $\bar{V} = 6,353$ [kV] $\sigma = 0,564$ | $\bar{V} = 4,107$ [kV] $\sigma = 0,661$ | $\bar{V} = 11,9 \cdot 10^{-3}$ [kV] $\sigma = 2,7 \cdot 10^{-3}$ |

Tabla 16: Valores de descargas parciales de las 25 muestras envejecidas.

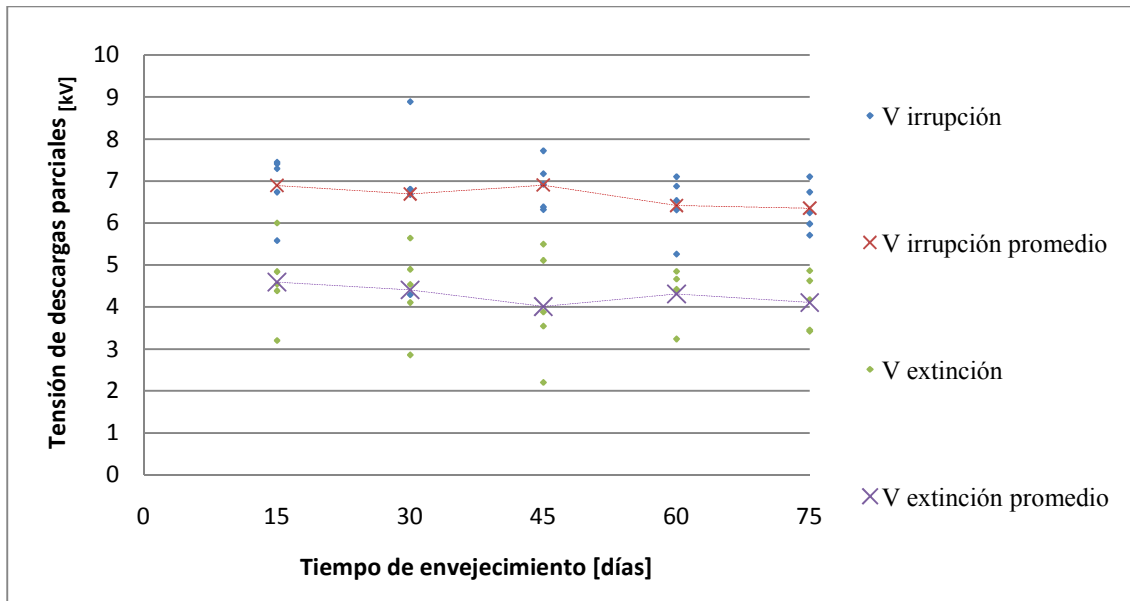


Figura 65: Representación de la evolución de las descargas parciales de las 25 muestras en función del tiempo de envejecimiento.

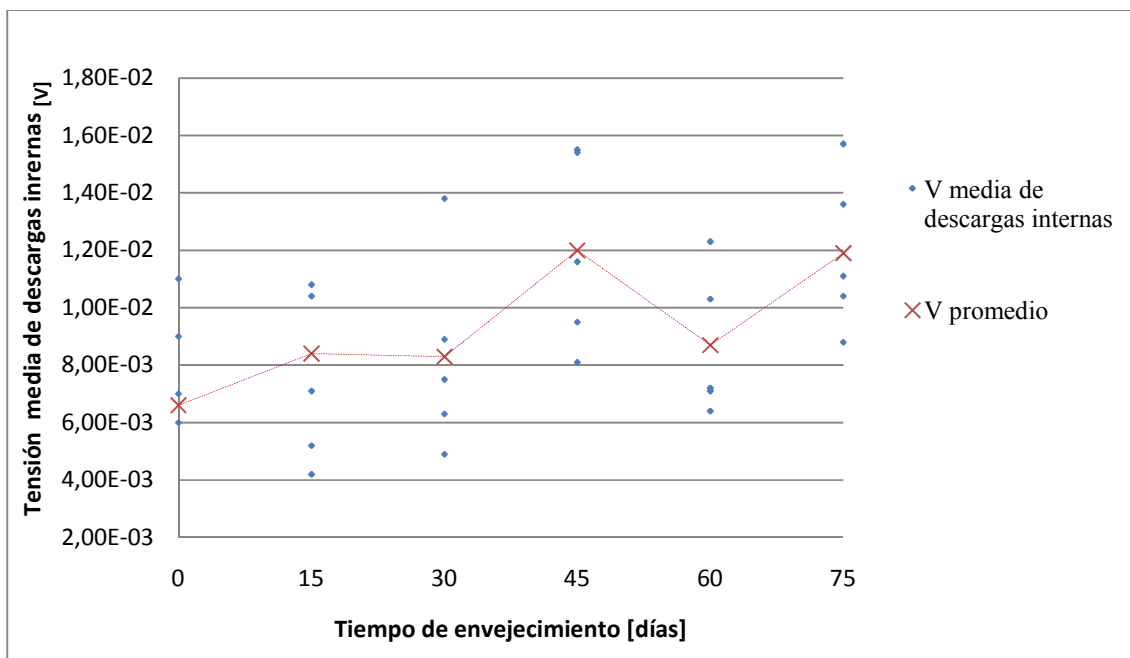


Figura 66: Representación de la evolución de la tensión media de las descargas internas de las 25 muestras en función del tiempo de envejecimiento.

También resulta interesante ver los patrones de las descargas parciales que tienen lugar en el material y observar la evolución de dichos patrones en función del tiempo de envejecimiento (figuras 67, 68, 69, 70 y 71).

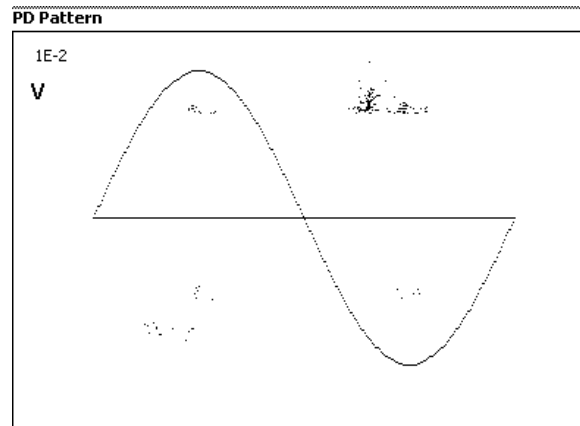


Figura 67: Patrón de descargas parciales de la muestra 3 (15 días de envejecimiento).

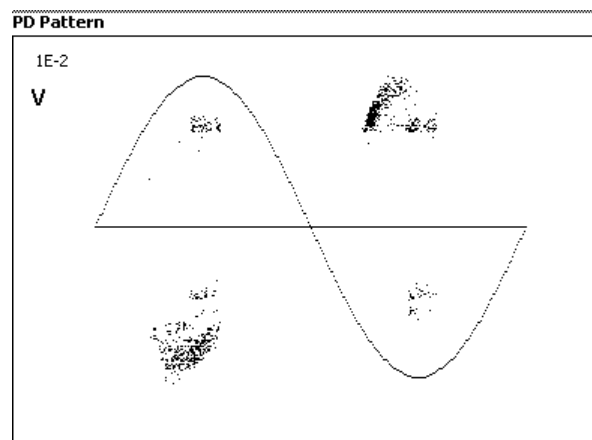


Figura 68: Patrón de descargas parciales de la muestra 7 (30 días de envejecimiento).

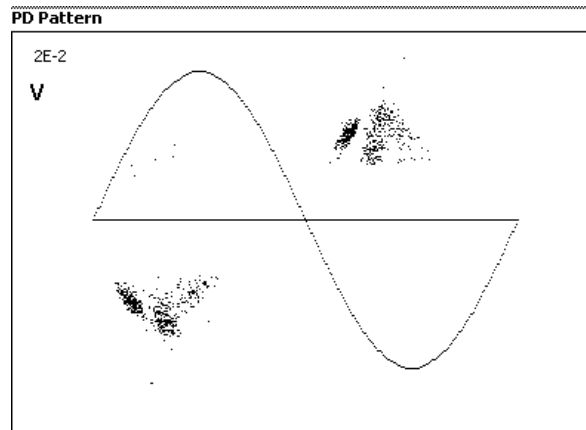


Figura 69: Patrón de descargas parciales de la muestra 13 (45 días de envejecimiento).

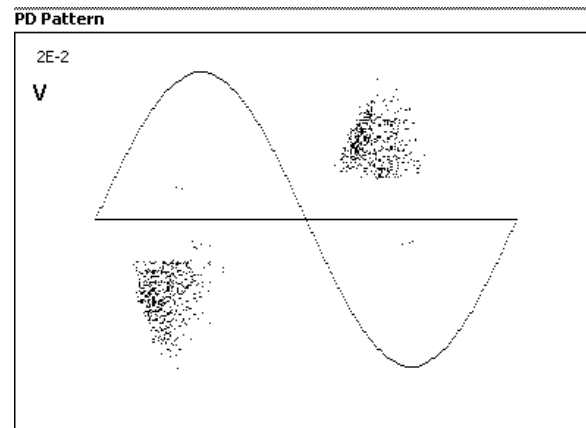


Figura 70: Patrón de descargas parciales de la muestra 19 (60 días de envejecimiento).

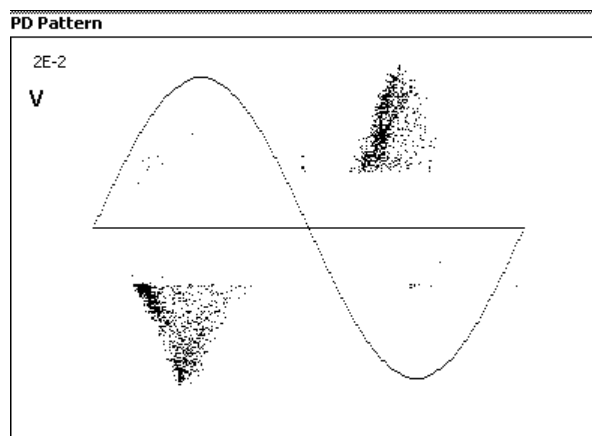


Figura 71: Patrón de descargas parciales de la muestra 22 (75 días de envejecimiento).



Es importante señalar la dificultad para identificar las descargas internas puesto que en el laboratorio hay mucho ruido que dificulta en gran medida interpretar bien lo que aparecen por pantalla en el osciloscopio. En este estudio interesa identificar el momento en el que aparecen y desaparecen y sacar de manera complementaria un patrón aproximado de la forma de las descargas.

Como se puede ver en la tabla de valores (tabla 16) y en la gráfica que muestra la evolución de las descargas (figura 65), los valores de irrupción están bastante dispersos aunque dentro de un rango de valores más o menos determinado entre 5 kV y 9 kV, salvo alguna excepción. Algo similar pasa con la tensión de extinción con valores próximos a los 4 kV. Si se atiende al valor medio de tensión de las descargas internas se observa un aumento de un 40% durante el proceso de envejecimiento, como se puede comprobar en la gráfica (figura 66) y en los patrones de descargas (figuras 67, 68, 69, 70 y 71).

Con los datos obtenidos se observa una tendencia entre descargas parciales y tiempo de envejecimiento. A grandes rasgos se cumple la relación de que a mayor tiempo de envejecimiento la tensión de irrupción y extinción es menor, y el valor medio de las descargas es mayor. Quizás con mayor tiempo de envejecimiento esta relación se vería más clara. Lo que sí se puede concluir es que en general las descargas aparecen por encima de la tensión de envejecimiento lo que indica que trabajando a esta tensión durante el tiempo que ha estado, las descargas parciales no deberían haber sido un problema para este dieléctrico.

4.5 TENSIÓN DE RUPTURA.

En último lugar, se analizan los resultados de los ensayos de tensión de ruptura. En esta ocasión no se realiza la prueba a muestras sin envejecer porque ya se conocía la tensión a la que rompe este material por unas pruebas hechas en el laboratorio con anterioridad. La tensión inicial de ruptura es de 23 kV.

En la tabla 17 se muestran los valores de tensión de ruptura obtenidos, y en la figura 72 se muestra una gráfica de la evolución de tensión de ruptura en función del tiempo de envejecimiento.



| Tiempo de envejecimiento [días] | Muestras | Tensión de ruptura [kV] |
|---------------------------------------|----------|---|
| 0 | | 23 |
| 15 | 1 | 20,92 |
| 15 | 2 | 23,03 |
| 15 | 3 | 23,96 |
| 15 | 4 | 24,26 |
| 15 | 5 | 24,41 |
| | | $\bar{V} = 23,32$ [kV] $\sigma = 1,44$ |
| 30 | 6 | 23,64 |
| 30 | 7 | 23,77 |
| 30 | 8 | 24,41 |
| 30 | 9 | 22,41 |
| 30 | 10 | 22,19 |
| | | $\bar{V} = 23,28$ [kV] $\sigma = 0,95$ |
| 45 | 11 | 21,28 |
| 45 | 12 | 22,41 |
| 45 | 13 | 23,60 |
| 45 | 14 | 22,71 |
| 45 | 15 | 23,60 |
| | | $\bar{V} = 22,72$ [kV] $\sigma = 0,96$ |
| 60 | 16 | 23,82 |
| 60 | 17 | 23,15 |
| 60 | 18 | 19,75 |
| 60 | 19 | 21,82 |
| 60 | 20 | 22,59 |
| | | $\bar{V} = 22,23$ [kV] $\sigma = 1,57$ |
| 75 | 21 | 22,89 |
| 75 | 21 | 21,88 |
| 75 | 23 | 19,13 |
| 75 | 24 | 21,11 |
| 75 | 25 | 21,96 |
| | | $\bar{V} = 21,40$ [kV] $\sigma = 1,41$ |

Tabla 17: Valores de la tensión de ruptura de las 25 muestras.

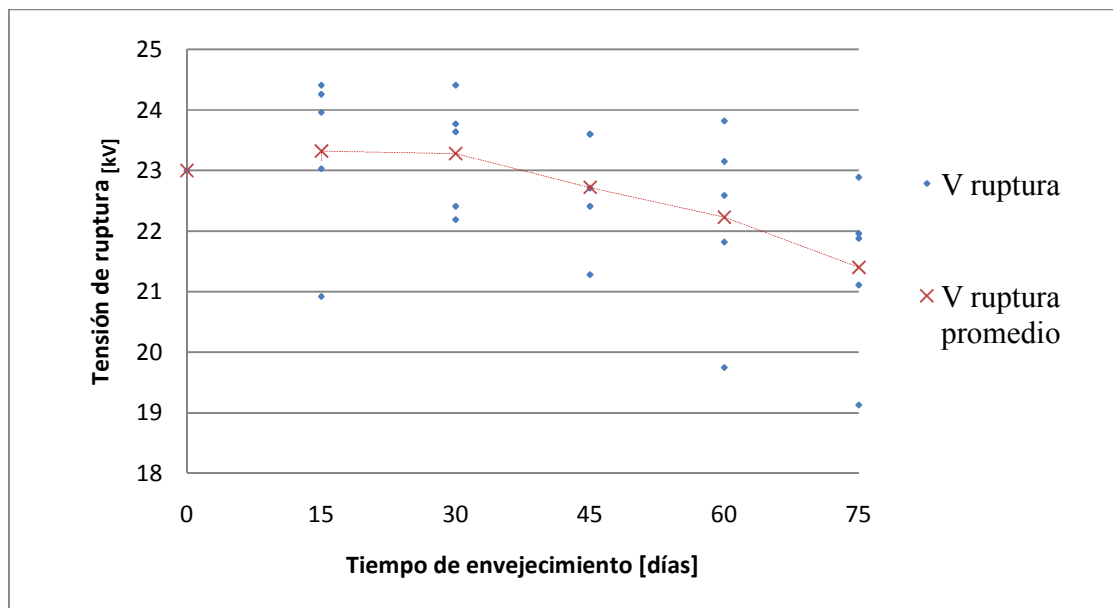


Figura 72: Representación de la evolución de la tensión de ruptura en función del tiempo de envejecimiento.

A partir de los valores medios obtenidos y de la evolución de la gráfica (figura 72) se observa que la tensión de ruptura de este material es bastante constante en el tiempo, disminuyendo ligeramente cuanto mayor es el tiempo al que ha estado sometido a tensión. Con 75 días de envejecimiento presenta unos valores un 8% más bajos que los valores iniciales.

A continuación se enseña una imagen de una de las 25 muestras después del ensayo en la que se ha remarcado, para que se pueda apreciar más fácilmente, la perforación que sufre el material al ser sometido a esta prueba (figura 73). Además se muestra una imagen del electrodo de medida donde se puede apreciar las marcas de todas las perforaciones sufridas por las 25 muestras (figura 74).



Figura 73: Muestra 4 tras ensayo de ruptura.



Figura 74: Electrodo tras ensayo de ruptura.





Capítulo V

5 CONCLUSIONES.

A lo largo de este proyecto se ha llevado a cabo un proceso de envejecimiento a un material aislante. Se han estudiado las propiedades más significativas que caracterizan un dieléctrico. Se han realizado los ensayos necesarios para obtener los valores numéricos de esas propiedades caracterizadoras. Y finalmente se han analizado los resultados obtenidos llegando a las siguientes conclusiones sobre el objeto de estudio:

La resistencia superficial del material disminuyó un 90% en el tiempo ensayado. Analizando los resultados obtenidos resulta evidente que la presencia de efecto corona en la superficie de contacto entre el material y los electrodos fue la causa de la disminución de la resistencia superficial del material en los 75 días que fue sometido a envejecimiento. Además se obtuvieron valores muy dispersos debido a que el efecto corona no es un fenómeno constante y no afectó por igual a toda la superficie del material en contacto con los electrodos. La superficie del material muestra un deterioro apreciable por lo que parece que este material no es apropiado para trabajar en circunstancias en las que pueda aparecer efecto corona.

La resistencia volumétrica del dieléctrico disminuyó un 30% en todo el tiempo de envejecimiento, lo que indica un deterioro en la estructura interna del material. Esto quiere decir que a una tensión constante de 5 kV el material sufre daños apreciables.

Los valores de tangente de delta fueron bastante constantes, aunque en ligero aumento, hasta 60 días de envejecimiento donde se produjo un rápido aumento de las pérdidas dieléctricas llegando a valores un 25% más altos que los iniciales. Esto indica un deterioro más acelerado del material a partir de estar 60 días sometido a tensión. La disminución de la permitividad en un 20% a lo largo de todo el proceso es otra prueba inequívoca del deterioro del material.



La tensión de ruptura del material fue disminuyendo, aunque lentamente, a medida que iba aumentando el tiempo de envejecimiento hasta alcanzar valores un 8% más bajos, lo cual concuerda con la disminución de la tangente de delta y de la resistencia volumétrica. El hecho que el valor de tensión de ruptura sea menor con el paso del tiempo de envejecimiento, indica que las propiedades dieléctricas del material se han visto reducidas.

Es interesante destacar que la variación en la tangente de delta, en la permitividad y en la resistencia volumétrica es muy similar, con valores entre el 20% y 30%, lo cual indica que estas magnitudes están muy relacionadas entre sí en lo que se refiere a caracterizar las propiedades dieléctricas de un aislante. Los resultados de los ensayos de resistencia volumétrica, tangente de delta y tensión de ruptura indican que el material, a una tensión constante de 5 kV durante 75 días, sufrió un desgaste y un deterioro en su estructura lo que redujo sus capacidades como dieléctrico.

Por otro lado la prueba de descargas parciales ofrece unos valores un poco dispersos. A pesar de no ser tan esclarecedora como las anteriores, puesto que las descargas parciales es un fenómeno estadístico, también arroja un resultado similar a las anteriores. La tensión a la que aparecen las descargas parciales fue disminuyendo con el tiempo, y el valor medio de éstas aumentó alrededor de un 40% durante el proceso, lo que indica un daño en la estructura interna del material.

Una idea para futuros proyectos es complementar el proceso de envejecimiento por tensión alterna, con un proceso de envejecimiento por temperatura. Sería muy interesante ver cómo responde eléctricamente el material después de haber sido sometido durante un periodo prolongado a altas temperaturas de trabajo. Para completar el estudio se pueden combinar los dos procesos de envejecimiento, hacer soportar al dieléctrico altas temperaturas durante un periodo de tiempo y luego ponerlo a tensión durante el mismo periodo de tiempo para después someterlo a los diversos ensayos, y así comparar estos resultados con los obtenidos en cada uno de los envejecimientos.



También sería interesante realizar la prueba de pulso electroacústico para ver los desplazamientos de carga que tienen lugar en el material pero sería necesario laminar el material para conseguir muestras de un grosor adecuado para el equipo disponible en el laboratorio.





Capítulo VI

6 PRESUPUESTO.

En el presupuesto que se presenta a continuación, se contemplan de un modo estimado, los costes de realización del proyecto, incluyendo los costes relativos al diseño, material y personal.

6.1 COSTE DEL MATERIAL.

Los costes asociados al material utilizado para el desarrollo del proyecto se resumen en la tabla 18. Se incluye todo el material empleado en el montaje del sistema de envejecimiento y en los ensayos.

| DESCRIPCIÓN | UNIDADES | COSTE UNIDAD | TOTAL |
|---------------------------|----------|--------------|--------|
| CUBAS DE PLÁSTICO | 2 | 45€ | 90€ |
| ACEITE DE TRANSFORMADOR | 30 | 6€ | 180€ |
| CABLE | 7 | 2€ | 14€ |
| TERMINALES | 60 | 0,2€ | 1,2€ |
| COBRE | 1 | 100€ | 100€ |
| FUSIBLES | 6 | 0,05€ | 0,3€ |
| ETANOL | 1/2 | 8€ | 4€ |
| ACETONA | 1/2 | 10€ | 5€ |
| BOBINA DE PAPEL | 1 | 6€ | 6€ |
| PAR DE GUANTES DE NITRILO | 100 | 0,1€ | 10€ |
| COSTE TOTAL DEL MATERIAL | | | 410,5€ |

Tabla 18: Coste del material.



6.2 COSTE DEL PERSONAL.

Para el cálculo de los costes de personal, se suponen los salarios brutos anuales mostrados en la tabla 19.

| | |
|-------------------------------------|----------|
| INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL | 30.000 € |
| TÉCNICO DE LABORATORIO | 30.000 € |

Tabla 19: Salario anual estimado por profesión.

Las cargas sobre los salarios son:

| | |
|------------------------|-------|
| Seguridad Social | 27% |
| Desempleo y F.P. | 1.7% |
| TOTAL | 28.7% |

Para un total de 1800 horas de trabajo al año, estos salarios suponen un coste por hora de trabajador mostrado en la tabla 20.

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL | 25 €/hora |
| TÉCNICO DE LABORATORIO | 25 €/hora |

Tabla 20: Coste por hora de cada trabajador.

Analizando la duración del proyecto y el tiempo invertido por el personal, se obtiene la tabla 21.

| CONCEPTO | TIEMPO | PERSONAL IMPLICADO |
|------------------------------|-----------|---|
| DESARROLLO DE LOS REQUISITOS | 1 SEMANA | INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL |
| DISEÑO DEL MONTAJE | 1 SEMANA | INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL |
| CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE | 1 SEMANA | INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL |
| REDISEÑO Y CAMBIOS | 1 SEMANA | INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL |
| ENSAYOS | 2 SEMANAS | INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL Y TÉCNICO DE LABORATORIO |
| DOCUMENTACIÓN Y REDACCIÓN | 4 SEMANAS | INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL |

Tabla 21: Duración del proyecto y personal empleado.



La tabla 22 refleja el coste total en mano de obra requerido para el diseño, montaje, pruebas y documentación del proyecto llevado a cabo.

| CONCEPTO | HORAS | COSTE/HORA | COSTE TOTAL |
|-----------------------------------|-------|-------------|-------------|
| DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE | 160 | 25 €/hora | 4.000 € |
| ENSAYOS | 80 | 2·25 €/hora | 4.000 € |
| REDACCIÓN Y EDICIÓN DEL PROYECTO | 160 | 25 €/hora | 4.000 € |
| COSTE TOTAL DE LA MANO DE OBRA | | | 12.000 |

Tabla 22: Coste total en mano de obra.

6.3 COSTE TOTAL.

Resumiendo, el coste total del diseño y desarrollo del presente Proyecto Fin de Carrera se estima en 12.402 €, como se puede ver en la tabla 23.

| CONCEPTO | COSTE TOTAL |
|-----------------------------|-------------|
| COSTE TOTAL DE MATERIAL | 402,5€ |
| COSTE TOTAL DE MANO DE OBRA | 12.000 € |
| COSTE TOTAL | 12.402,5€ |

Tabla 23: Coste total del proyecto.





Capítulo VII

7 BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Guión de prácticas de la asignatura Instalaciones Eléctricas I “Caracterización de los materiales aislantes”; Simón Dávila Solano.
- [2] “Engineering Dielectrics Volume IIB, Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Measurement Techniques” (AST STP 926); R. Bartnikas,
- [3] “High Voltage Engineering: Fundamentals” Second Edition (2000) Newnes; E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel.
- [4] “IT12: Instrucciones de uso del electrómetro de alta resistencia Keithley Modelo 6517A”; LINEALT.
- [5] “IT06: Instrucciones para la realización de ensayos dieléctricos de tangente de delta y capacidad”; LINEALT.
- [6] “TechImp PDCheck Operator’s Manual”.
- [7] “IT04: Instrucciones para la realización de ensayos dieléctricos de tensión alterna”; LINEALT.

